

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Vliv technologických parametrů laseru na kvalitu řezu při
řezání plastů

Laser Technological Parameters Influence on Cut Quality
at Cutting of Plastic

Student: Bc. Lichovník Jiří

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Lichovník**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv technologických parametrů laseru na kvalitu řezu při řezání plastů**
Laser Technological Parameters Influence on Cut Quality at Cutting of Plastic

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Měření drsnosti povrchu se zaměřením na plasty.
3. Návrh experimentu (materiál, technologické parametry, atd.).
4. Experimentální část.
5. Zhodnocení, diskuze výsledků a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

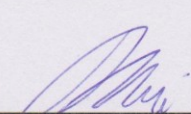
- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015


Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry

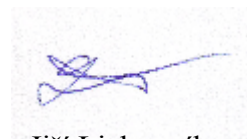



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 8.5.2015



Jiří Lichovník

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněná v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 8.5.2015



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jiří Lichovník

Adresa trvalého pobytu autora práce: Březová u Vítkova, č.p. 137, 747 44 Březová

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LICHOVNÍK, J. *Vliv technologických parametrů laseru na kvalitu řezu při řezání plastů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 70 s. Vedoucí práce: Čep, R.

Diplomová práce pojednává o vlivu technologických parametrů laseru na kvalitu řezu u plastových desek. V úvodu jsou popsány různé možnosti výroby a technologie plastů a jejího použití. Pro vybrané druhy plastových vzorků byly zvoleny parametry pro řezání plastů. Následně se plastové vzorky vzaly na měření drsnosti povrchu. Posléze se naměřené hodnoty vyhodnotily do grafů a zjistily se optimální podmínky pro řezání určitého druhu plastu.

ANNOTATION BACHELOR THESIS

Lichovník, J. *Laser Technological Parameters Influence on Cut Quality at Cutting of Plastic*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering metrology, 2015, 70 p. Thesis head: Čep, R.

The thesis deals with the influence of technological parameters of laser cutting on quality cut on plastic plates. The introduction describes the various possibilities of polymers production and its use. For various types of polymer samples were chosen parameters for cutting process. Subsequently, were on polymer samples done measurement of surface roughness. Results were summarized and its values shown in graphs to indicate easily optimal condition of cutting for each kind of polymer.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	8
1 Úvod do problematiky	9
2 Výroba a technologie plastů	10
2.1 Lisování a přetlačování plastů.....	10
2.1.1 Lisování	11
2.1.2 Přetlačování plastů	11
2.2 Vstřikování plastů	12
2.2.1 Vstřikování s plynem (GIT).....	12
2.2.2 Vstřikování s podporou vody (WIT)	13
2.2.3 Vstřikování prášků (PIM)	13
2.3 Vytlačování	13
2.4 Vyfukování.....	14
2.4.1 Vytlačovací vyfukování	14
2.4.2 Vstřikovací vyfukování.....	14
2.5 Rotační natavování.....	15
3 Typy použitelných plastů v praxi.....	15
3.1 Rozdělení plastů	16
3.1.1 Podle aplikace	16
3.1.2 Podle působení teploty.....	16
3.1.3 Podle nadmolekulární struktury	17
3.1.4 Další možnosti rozdělení plastů	17
3.2 Vytipování plastů	17
3.2.1 Polyamid (PA)	18
3.2.2 Polymethylmetakrylát (PMMA)	18
3.2.3 Polysulfon (PSU)	19
3.2.4 Polykarbonát (PC).....	20
3.2.5 Polypropylen (PP).....	21
3.2.6 Polyoxymetylen (POM)	21
4 Metody měření povrchu.....	22
4.1 Drsnost povrchu	22
4.2 Metody měření drsnosti povrchu	24
4.3 Mechanické metody	26
4.3.1 Porovnání mechanických metod [30]	27
4.4 Optické metody	27

4.4.1	Optický profilometr MicroProf FRT	27
4.4.2	Konfokální mikroskopie	28
4.4.3	Polarizační mikroskop	29
4.5	Jiné metody	30
4.5.1	Metoda transmisní elektronové mikroskopie TEM	30
4.5.2	Metoda rastrovací elektronové mikroskopie SEM	30
5	Experimentální část.....	32
5.1	Řezání vzorků.....	32
5.1.1	Technická data [41]	32
5.1.2	Možnosti řezání vzorků	33
5.2	Měření drsnosti.....	36
5.2.1	Hommel-Elomic W5	36
5.2.2	Měření a vyhodnocení drsnosti.....	37
5.3	Celkové hodnoty pro plexisklo	58
5.4	Celkové hodnoty pro polyamid	59
5.5	Celkové hodnoty pro polypropylen.....	60
6	Závěr	61
7	Seznam použitých zdrojů.....	63
8	Seznam příloh	68

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
R _m	[MPa]	pevnost v tahu
R _a	[μm]	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R _z	[μm]	největší výška profilu
α	[K ⁻¹]	součinitel teplotní roztažnosti
f	[mm/s]	řezná rychlost
P	[%]	výkon stroje
T _m	[°C]	teplota tání
T _g	[°C]	teplota zesklenní
T _f	[°C]	teplota viskózního toku
PE		polyolefin
PS		polystyrenová hmota
PVC		polyvinylchlorid
PF		fenolformaldehydové hmoty
UF		močovinoformaldehydové hmoty
PA		polyamid
PC		polykarbonát
POM		polyoxymetylen
PMMA		polymethylmetakrylát
PU		polyuretan
PSU		polysulfon
PTFE		tetrafluoretylen
PI		polyimidy

1 Úvod do problematiky

Plasty neboli polymery v dnešní době jsou hodně žádaným zbožím. Proto mnoho firem v zahraničí i v naší republice, ale také po celém světě, se zabývají jejich výrobou, distribucí a vývojem. Plasty můžeme vidět ve všech odvětvích průmyslu, setkáváme se s nimi v průběhu celého dne i života. Bez plastových výrobků si nedokážeme představit (všední) život. Průmyslové firmy, které se zabývají problémy, které mají plasty, jako jsou lesk, odlišný odstín barvy, propustnost světla, rozměrová nestabilita, drsnost povrchu či vylepšení kvality výrobků. [32]

Dodržování jakosti povrchu je zásadní součástí technologické kázně a každá firma si ji pečlivě hlídá. Dobrá jakost povrchu při výrobě součástí při maximálně dosažitelné hospodárnosti je důležitým požadavkem výroby. K dosažení jakosti povrchu jsou nutná opatření, jednak ryze technického, tak ekonomického charakteru.

Drsnost povrchu lze označit jako jeden z nejdůležitějších parametrů tzv. integrity povrchu. Integritou povrchu je nazýván soubor vlastností povrchu výrobku, které byly změněny technologickým procesem a mají rozdílné vlastnosti vzhledem k základnímu materiálu. [2]

V současné době se k dělení kovových i nekovových materiálů využívá mnoho nekonvenčních technologií. Nekonvenční technologie nepracují na principu úběru materiálu mechanickou prací, jako konvenční technologie, ale k úběru materiálu dochází pomocí fyzikálních nebo chemických principů. Tyto technologie jsou často výkonnější a ekonomičtější než běžné konvenční technologie.

Při současných požadavcích na vysokou kvalitu, ekologii a nízké náklady výroby se využití nekonvenčních technologií neustále zvyšuje. Dělení kovových materiálů můžeme rozdělit podle několika hlavních metod. Počínaje řezáním plamenem, řezáním laserem a konče moderním vysokotlakým řezáním vodním paprskem. Každá z těchto technologií má své výhody i nevýhody, které zabraňují univerzálnímu rozšíření.

Ve strojírenském průmyslu můžeme laser využít pro mnohé aplikace, jako jsou svařování, dělení materiálů, vrtání, povrchová úprava apod. Veškeré využívané lasery v průmyslu se neustále vyvíjejí a zdokonalují, jejich pořizovací cena klesá a tím pádem vzrůstá i množství firem, jež do svého strojového parku lasery zařazují. Dnes už je většinou laser považován za standardní vybavení firem, které se zabývají dělením materiálů. [1]

Cílem diplomové práce je zjištění, při jakých parametrech laseru se změní kvalita povrchu při řezání různých druhů plastových desek. Zjišťuje se jak parametr laseru od jeho

zvolení řezné rychlosti po zvolení výkonu laseru a následně po odřezání daných vzorků se zjišťuje kvalita neboli drsnost řezaného povrchu.

2 Výroba a technologie plastů

Plasty, se mohou nazývat jako plastické hmoty nebo zcela obecným názvem „umělé hmoty“, označující skupinu syntetických nebo polosyntetických polymerních materiálů. Poměrně často obsahují další látky, které zlepšují užité vlastnosti, např. odolnost proti stárnutí, zvýšení houževnatosti, pružnosti apod. Polymery se můžou formovat do předmětů, filmů nebo vláken. Název mají odvozen z faktu, že plasty jsou tvarovatelné – jejich vlastností je plasticita. Plasty mají nebo se vyznačují velkou stálostí vlastností, jako je např. tepelná odolnost, tvrdost a pružnost. Jejich výhodou je nízká hustota, chemická odolnost, jednoduchost složení a struktury a dobrá zpracovatelnost energeticky málo náročnými technologiemi vhodnými pro masovou výrobu.

Zásadou toho mohly být použity také ve všech průmyslových odvětvích i v domácnostech.

Slovo „plastický“ označuje materiál, který je charakterizován specifickým chováním při deformaci pod smykovým napětím.

Z různých plastů se dále vyrábějí slitiny jako jsou polymerní směsi. Používají se v automobilovém průmyslu (přístrojové desky, součásti interiérů, nárazníky, disky), ve výpočetní a sdělovací technice (kryty mobilních telefonů), v elektronice nebo v elektrotechnice (zástrčky, vypínače). [3]

2.1 Lisování a přetlačování plastů

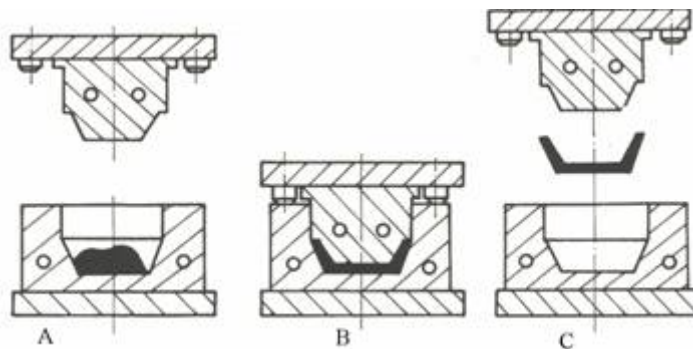
Jsou to základní technologické způsoby, které byly vytvořeny jako jedny se začínajících technologických postupů při vyrábění plastů. Převážně se těmito způsoby zpracovávají reaktoplasty. V dnešní době jsou tyto technologie měněny za technologii vstřikováním, neboť se výrazně snižuje celkový výrobní cyklus, odpadají přebytečné operace a snižuje se prašnost. [4]

2.1.1 Lisování

Lisování je další možnost tváření plastů v ohřívané formě, nejčastěji ocelové, kdy na materiál budeme působit tlak pro dosažení požadovaného nebo předepsaného tvaru. Základními technologickými veličiny lisování plastů jsou: lisovací tlak, teplota lisování a doba vytvrzování. Lisovací tlak má vliv na kvalitu povrchu vylisku a smrštění. Vše je závislé na typu hmoty, geometrii výrobku, na teplotě předehřevu a teplotě lisování. Tlak je v rozmezí 10 až 60 MPa. Lisovací formy vytápíme elektrickým odporovým topením na teplotu lisování. Teplota lisování je závislá na typu plastu, tloušťce, geometrii a teplotě předehřevu, které jsou v intervalu od 130 do 190 °C. Doba tvrdnutí se určuje podle tloušťky stěny požadovaného výrobku.

Podle použitého tlaku, lisování dělíme na nízkotlaké a vysokotlaké, kdy nejvyšší stupnicí je 3,5 MPa. [4]

Následný postup lisování: dutina nástroje se naplní práškem (tabletou, kašovitou hmotou, apod.) o přesně předepsaném objemu. V dopadu styku plastu s ohřívanou formou dojde k plastikaci a tlakem tvárníku se dokončí plastikace a dojde k zaplnění tvarové dutiny formy. Přichází odlehčení, které je klíčové z hlediska odplynění taveniny plastu a dokončení lisování. V materiálu, v důsledku přidávaného tepla, proběhne vytvrzování, což je nejdelší část lisovacího cyklu. Tato část je nazývána doba vytvrzování a závisí na tloušťce stěny, druhu plastu, teplotě formy. Po ztvrdnutí formu otevřeme, vylisek vyhodíme a daná forma se očistí a celý cyklus dále opakujeme. [4]



Obr. 1 Princip lisování termoplastů [4]

A - vložení reaktoplastu do dutiny formy, B - lisování a vytvrzování, C - vyhození vylisku

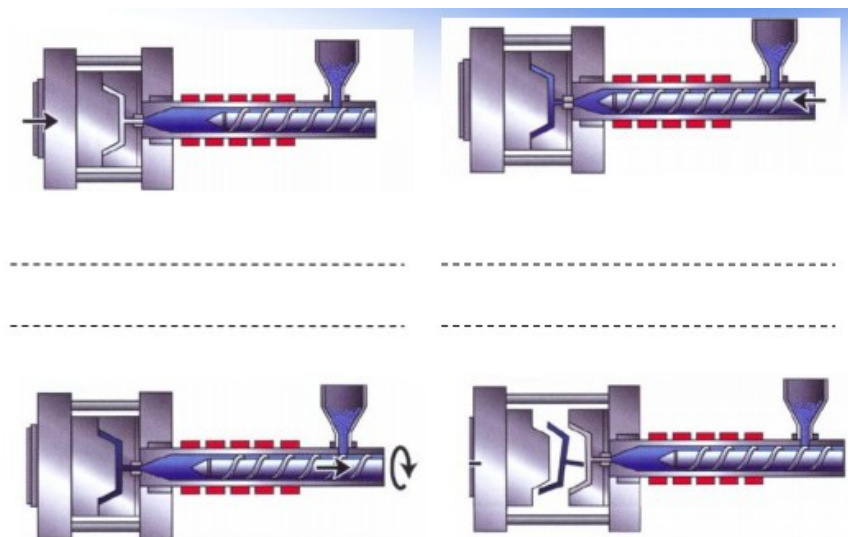
2.1.2 Přetlačování plastů

Přetlačování reaktoplastů je možnost, při kterém se dávka plastu nekládá přímo do tvarové dutiny formy, ale do výpomocné dutiny formy, odkud je po zplastikování přetlačena tlakem vtokovými kanálky do vlastní dutiny formy. Přetlačování používáme pro

výlisky těžkých tvarů. Přetlačovací tlaky jsou na rozdíl od lisování o dost vyšší, jsou kolem 50 až 100 MPa, mohou se také snížit předeheřevem plastu. [4]

2.2 Vstřikování plastů

Princip vstřikování je založen na tom, že plast je v podobě granulí nasypán do násypky, v které je odebrán pracovní částí vstřikovacího stroje, která plast dopravuje tavicí komorou, kde za soudobého účinku tření a ohřívání plast taje a vzniká tavenina. Tavenina je dále vstřikována do dutiny formy, kterou úplně zaplní a převezme její tvar. Následuje tlaková fáze pro snížení smrštění a tvarových změn. Forma převezme teplo od plastu a pomocí ochlazování ztuhne ve finální výrobek. Následně se forma otevře, výrobek se vyhodí a celý cyklus následně opakujeme.[5]



Obr. 2 Technologie vstřikování plastů [5]

2.2.1 Vstřikování s plynem (GIT)

Proces vstřikování je podobný jak u klasického vstřikování, ale s rozdílem, že vstřikovaný plyn má funkci dotlaku. Používá se vysoce čistý dusík, který má minimálně 99,8 % a tlakem 10 až 30 MPa. Plyn zaujme místo plastického jádra a tím utvoří dutý prostor. Velkou výhodou je, že je 20-30% úspora materiálu, chlazení je rychlejší a tím mnohem kratší doba cyklu, také se zmenší smrštění. Používá se k výrobě výlisků s malou tloušťkou stěny, držadel k nábytkům i automobilům, přepravek lahví, palet a dalších věcí. [7], [8], [32]

2.2.2 Vstřikování s podporou vody (WIT)

Tato metoda je podobná jako u plynu, ale pro výrobu dutých těles se vstřikuje voda. Voda se vstřikuje jednou či více pumpami do tekuté taveniny, teplota vody se volí podle určitého druhu plastu. Přední část vody má vliv na plastický materiál jako píst. Voda je vytlačena vzduchem, odsáta nebo se taktéž může vylévat mimo formu a díky zásobníku se vrací zpět do oběhu. [7], [8], [32]

2.2.3 Vstřikování prášků (PIM)

Před samotným procesem vstřikování prášků dojde k promíchání prášku s pojivem a následné granulaci směsi. Pak je postup obdobný jako při klasickém vstřikování, po zchlazení má výrobek zelenou barvu, výrobek se vytáhne a přesune se do pece, kde musí být teplota okolo 450 °C k vypálení polymeru, výsledkem je že výrobek má hnědou barvu.

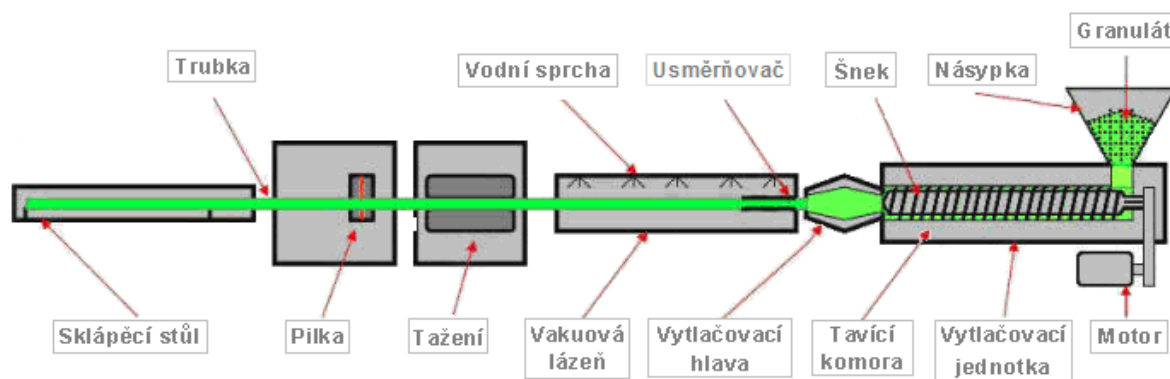
Pak následuje spojení kovového nebo keramického prášku v pecích kde jsou teploty okolo 2000 °C, které se volí podle druhu prášku. Výsledkem jsou díly homogenní. [7], [8], [32]

Základním materiálem pro tuto technologii vstřikování s prášky jsou tvrdé kovy, oceli, karbidy křemíku, oxidy hliníku, porcelán, ale i měď atd. Tyto směsi se musí promíchat s pojivem, která je první fází výroby daného dílu. [7], [8], [32]

2.3 Vytlačování

Vytlačování je další metoda vyznačující se tím, že plast v plastickém stavu se kontinuálně dává do předepsaného tvaru, který je upevněn snížením teploty plastu.

Důležitou částí vytlačovací linky je vytlačovací stroj, který se skládá ze šneku a ohřívaného pouzdra. Do ohřívaného pouzdra vytlačovacího stroje se v přesném poměru dávkuje všechny komponenty plastové směsi, ty jsou díky šneku zamíchány – roztaveny – plastifikovány a dopraveny do rovné vytlačovací hlavy, která jí dá tvar. Ten je tvarově upevněn pomocí tří kalandrovacích válců. Následně je pás ochlazen a zformátován na námi daná rozměr. [7], [9], [10]



Obr. 3 Princip výtlačování

2.4 Vyfukování

Vyfukování je takový postup, při kterém je polotovár tvarován ve vyfukovací formě přetlakem vzduchu do tvaru uzavřeného tělesa. Materiál se musí ohřát do plastického stavu, kdy materiál má potřebnou tvarovatelnost, ale přitom je ještě dostatečně soudržný. Polotovarem je předlisek vyrobený vstřikováním, výtlačováním nebo také i fólie. Vyfukováním se zpracovávají hlavně PE a PP, PVC a jeho kopolymery a v poslední době PET. V menší míře se vyrábějí termoplasty, jako např. POM, PC, kopolymery PS a jiné. [6], [9], [11]

2.4.1 Vytlačovací vyfukování

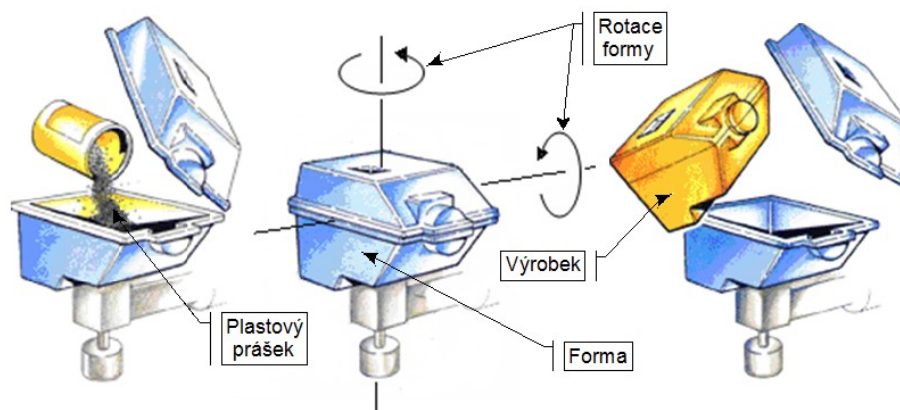
Vytlačovací vyfukování je nejrozšířenější typ výroby dutých výrobků. Na stroji se vytlačí polotovár – parizon. Tato trubka se přestříhne v daném okamžiku, jakmile dosáhne konečné délky a střižné nůžky jí podrží do doby, dokud se nedostaví vyfukovací forma, nebo jí přenese do formy, kde je usazena na trn. Uzavřením formy dojde ke vzniku hrdla a vnitřního průměru a k svaření dna. Následně se dotáhne stlačený vzduch a dojde k vyfouknutí. Po zchlazení a ztuhnutí se těleso vyfoukne a odstraní se přetoky od svařených ploch. [8]

2.4.2 Vstřikovací vyfukování

Tuto technologii použijeme k výrobě dutých těles malých rozměrů a k tvarům velmi členitých – ve vstřikovací formě se nanese na speciálně vyrobený trn v dutině vstřikovací formy tavenina plastu. Tím vytvoříme polotovár, a to s dnem a kompletním hrdlem. Také se po nanesení plastu trn přenese do formy, kde bude vyfouknut stlačeným vzduchem, zchlazen a kde plast ztuhne, otevřením nástroje a vyhozením z trnu stlačeným vzduchem pak následně celý cyklus se opakuje. Nebo se tělesa ochladí a pak se následně ohřejí a vyfouknou. [8], [9], [32]

2.5 Rotační natavování

Plastový prášek nasypeme v přesně daném množství do formy, kde pomocí gravitace a teplého vzduchu okolo 260 – 450 °C, tvarem zvolené formy a poměrně pomalým otáčením 12 až 40 ot.min⁻¹ vyráběn na dutý výrobek. Po bezvadném protavení a spojení prášků se forma dá do ochlazovací komory, kde se zchladí. Podle typů produktů a tloušťky stěny trvá výrobní cyklus chladnutí několik desítek minut až hodin. [32], [8], [12]



Obr. 4 Princip rotačního natavování [12]

3 Typy použitelných plastů v praxi

V dnešní době je na trhu několik tisíc různých variant plastů. V průmyslu má výrazné uplatnění jen pár desítek typů plastů. Z celkového množství celosvětové výroby plastů je skoro 80 % jen šest typů plastů a 70 % výroby jen tři typy, kterými jsou polyolefiny, styrenové hmoty a polyvinylchlorid. Produkce termoplastů se pořád zvětšuje, a to dvěma směry, kdy jeden směr je výroba stále nových typů polymerů a druhý směr je úprava dosavadních plastů. Toto zvětšování počtu materiálů má své klady pro konstrukci a produkci dílů z plastů, v kterém by došlo k zřetelné úpravě ceny, na druhou stranu to klade větší požadavky na znalosti konstruktérů.

Když volíme materiál, musíme vzít v úvahu jeho vlastnosti a cenu hmoty, ale i jeho zpracovatelnost, technologické podmínky, a také dobře zvolit stroj. Vlastnosti a odolnost plastů jsou dány jejich chemickou a fyzikální strukturou, ale můžou být ovlivněny i zpracovatelským procesem.

Výhody a nevýhody plastů lze dát do následujících bodů. Mezi výhody patří nízká měrná hmotnost, výborné zpracovatelské vlastnosti, plasty jsou izolanty, jsou korozivzdorné, tlumí rázy a chvění. Nevýhodou jsou nízké mechanické a časově závislé vlastnosti, kříp, ekologická zatížitelnost. [13]

3.1 Rozdělení plastů

3.1.1 Podle aplikace

- **široké použití** - polyolefiny (PE, PP), polystyrénové hmoty (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové hmoty (UF)
- **inženýrská aplikace** - polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoxymetylen (POM), polymetylmetakrylát (PMMA), terpolymer ABS, polyfenylénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice
- **špičková aplikace** - polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), tetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI) a další. [13]

3.1.2 Podle působení teploty

- **termoplasty** – jedná se o materiály polymerní, které se při zahřívání dostávají do plastického stavu, do situace vysoce viskózních newtonovských kapalin, kde je můžeme jednoduše tvářet a opracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu se dostanou zchlazením pod teplotu tání T_m , resp. teplotu viskózního toku T_f . Jelikož při ohřívání nedochází ke změně chemické struktury, můžeme proces měknutí a tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. Jedná se o fyzikální proces. K termoplastům řadíme plasty jako je polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA), atd.
- **reaktoplasty** – nazývané termosety, které v první fázi ohřívání měknou a můžeme je tvářet, ale jen po omezenou dobu. Při dalším ohřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zasíťování struktury, k tzv. vytvrzování. Výrobek je možné vzít za jednu velkou makromolekulu. Zchlazováním reaktoplastů se děje mimo nástroj, protože zajištění rychlého ohřívání formy pro vytvrzení a následném rychlém zchlazení materiálu by bylo velmi namáhavé. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, při dalším ohříváním dochází k rozkladu hmoty. Patří sem fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty apod.
- **kaučuky, pryže a elastomery** – také v první fázi ohřívání měknou a můžeme je tvářet, ale jen po omezenou dobu. Při dalším zahřívání dojde k chemické reakci – prostorovému zasíťování struktury, kde se děje tzv. vulkanizace. U elastomerů na bázi termoplastů nedochází ke změnám chemické struktury, proces měknutí a tuhnutí lze opakovat bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální děj. [13]

3.1.3 Podle nadmolekulární struktury

- **amorfní plasty**- makromolekuly upoutají zcela nahodnou pozici. Může zde patřit např. PS, PMMA, PC apod. Jsou charakterizovány tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, modulem pružnosti a jsou průhledné, i když mají nízký index lomu 1,4 až 1,6. Propustnost čírého světla je 92 %, transparentní anebo průhledné z 60 %. Součinitel teplotní roztažnosti α je nižší než u semikrystalických polymerů. Použitelnost amorfních polymerů je do teploty zesklnění T_g .
- **krystalické**- označují se jako stupeň krystalinity, která se pohybuje od 40 do 90 % a vyjadřuje poměrný podíl uspořádaných oblastí uložených mezi amorfními. Nemůžeme nikdy dosáhnout 100 %, proto se krystalické plasty značí jako semikrystalické. Patří sem PE, PP, PA, PTFE, POM. Jejich barva je mléčně zakalená, index lomu je větší a jejich charakterem je houževnatost materiálu, pevnost a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Jejich použitelnost je do teploty tání T_m . [13]

3.1.4 Další možnosti rozdělení plastů

1) Podle druhu přísad

- neplněné plasty –je takový plast, u kterého počet přísad neovlivňují vlastnosti polymerní matrice.
- plněné plasty – plnivo ovlivňuje jak fyzikální tak i mechanické vlastnosti. Makromolekulární látka plní funkci pojiva a určuje základní fyzikální a mechanické vlastnosti hmoty. Přísadou jsou plniva, stabilizátory, maziva, barviva, změkčovadla, iniciátory, nadouvadla, tvrdidla, retardéry hoření apod. [13]

2) Podle polarity

- polární plasty – mají trvalý dipól a mezi tyto plasty patří PA, některé pryskyřice.
- nepolární plasty – nemají trvalý dipól a patří sem PE, PP, PS. [13]

3) Podle původu

- přírodní – jsou zřízeny na přírodních makromolekulárních látkách, např. na bázi celulózy, latexu, kaseinu atd.
- syntetické – k výrobě je použita chemická cesta. [13]

3.2 Vytipování plastů

Do diplomové práce jsem si vytipoval k experimentální činnosti následující druhy materiálů, na kterých je možné zkoušet technologické parametry laseru a následně měření drsnosti povrchu vybraných plastových výlisků uřezaného vzorku.

3.2.1 Polyamid (PA)

Polyamid je tuhý plast, který snáší velké zatížení a je velmi příznivě obrobitelný. Výrobní technologie extrudace neboli lití představuje výrobek o vysoké houževnatosti, s dobrými kluznými vlastnostmi, s vysokou odolností proti otěru a dobrou chemickou stálostí proti mnoha typům olejů, tuků, benzínů atd. [14]

Odolnost při odlišných prostředcích a teplotách

Výborný v silných i slabých zásadách, všech druhů solí, rozpouštědel, chlorovaných uhlovodících, ropných produktů, sirovodíku, tucích a olejích, vodě, a to i za zvýšených teplot.

Neodolává: kyselinám (chlorovodíkové, sírové, dusičné, ledové octové, mravenčí), fenolům, kresolům, oxidačním látkám, suchému i vlhkému oxidu siřičitému. Výrobky lze vystavovat krátkodobě teplotám od -30 °C do 110 °C. [14]

Vlastnosti

Hustota	1,14	g.cm^{-3}
Bod tání	215 - 235	°C
Pevnost v tahu (přetržení)	min. 65	MPa
Mez kluzu v tahu	68 - 73	MPa
Tažnost	30 - 50	%
E-modul pružnosti v tahu	min. 2450	MPa
E-modul pružnosti v ohybu	min. 2100	MPa
Rázová houževnatost Charpy 23 °C a -20 °C	nezlomí se	
Vrubová houževnatost Charpy 23 °C	min. 7	kJ.m^{-2}
Tvrdost (Shore D)	min. 80	MPa
Vnitřní odpor (vzorky „as made”)	>1010	ohm
Povrchový odpor (vzorky „as made”)	>1010	ohm
Elektrická pevnost	> 22	kV/mm
Tepelná vodivost	0,33	W.m-10C

3.2.2 Polymethylmetakrylát (PMMA)

PMMA je transparentní termoplast, který je běžně známý jako akrylátové sklo nebo akrylát. Často ho použijeme jako alternativa místo skla, protože je poměrně lehký a velmi odolný proti rozbití. Z chemického hlediska se jedná o syntetický polymer methylmetakrylátu.

Dnes se PMMA používá více než kdy jindy. Navzdory tomu, že se jedná o jeden z nejstarších plastů, který se v současné době používá, zůstává stále materiálem pro širokou

škálu použití. Mezi jeho velké přednosti patří odolnost vůči povětrnostním podmínkám a optická čírost. [15], [16]

Použití PMMA

Velká průhlednost PMMA tvoří ideální alternativu ke sklu, převážně tam, kde jsou nárazy nebo hmotnost zásadním problémem. Kromě toho je PMMA možné vytvořit s lidskou tkání a může být užitečným materiálem pro protézy a transplantace, zubní protézy, optické čočky atd. PMMA má velmi široké použití pro výrobky každodenní potřeby, jako jsou tužky, vlasové spony, knoflíky, různé nádoby a další potřeby pro domácnost. Ve stavebnictví převládá využití PMMA pro vnitřní i venkovní osvětlení, signální ukazatele, nábytek, dělicí příčky, solární kolektory, barevná skla do koupelen atd. V elektronickém průmyslu je používán pro rozvod světla pro podsvícení TFT-LCD a díky lepší odolnosti proti nárazu je využíván na optická média (CD, DVD). [15], [16]

Vlastnosti

Hustota PMMA činí 1,17-1,20 g/cm³, to je méně než polovina hustoty skla. Má dobrou mechanickou odolnost, vyšší než sklo a polystyren, ale stále výrazně nižší než polykarbonát a některé další technické polymery. Světelná propustnost PMMA činí až 92 %, to dokazuje odrazem okolo 4 % svého povrchu, a to díky indexu lomu 1.4914 na 587,6 nm.. Povrch PMMA se smývá a rozpouští v různých organických rozpouštědlech. Díky jeho hydrolyzační esterové skupině je jeho odolnost vůči různým jiným chemickým látkám nízká. [15], [16]

3.2.3 Polysulfon (PSU)

Termoplast, který je vyroben polymerací, který můžeme zařadit mezi výborné materiály. Tento plast má vysokou tepelnou, chemickou a mechanickou odolnost. Je odolný proti hydrolyze a mnoha druhům záření. Tepelně stabilní do +150 °C. [17]

- standardně se vyrábí ve žluté-průsvitné barvě
- vyniká vysokou mechanickou pevností, tuhostí, tvrdostí
- má dobré dielektrické vlastnosti
- použití pro potravinářský a zdravotnický průmysl
- výrobní program – tyče, desky [17]

Tento materiál vyniká dostatečnou chemickou odolností, odolností vůči ultrafialovému záření, záření gama a rentgenovému záření. Tento materiál má také výbornou zpracovatelnost, může se ohýbat, řezat a vrtat. Vyrábí se v průhledném provedení jantarové barvy. Polysulfon se může obohatit o skelná vlákna – je to pro zvýšení dlouhodobé pevnosti

při využívání ve vyšších teplotách. Materiál můžeme použít pro výrobu přístrojů, nástrojů, laboratorních zařízení, lékařské techniky a zařízení pro potravinářský průmysl. [18]

Vlastnosti

- vysoká mechanická pevnost
- vysoká tuhost
- vysoká odolnost proti mnoha druhům záření
- vysoká rozměrová stabilita
- vysoká odolnost vůči hydrolýze [17], [18]

3.2.4 Polykarbonát (PC)

Desky z plného polykarbonátu jsou použity jako řešení v nejrůznějších interiérech (bez UV filtru), nebo je možné je použít pro venkovní použití (možnost s oboustranným UV filtrem), kde je požadována vysoká optická propustnost, výborný povrch a hlavně nerozbitnost! Plný polykarbonát se dá jednoduše zpracovávat a ukazuje mimořádně výborné vlastnosti jak při nižších, tak i při vyšších teplotách (v rozsahu od -40 °C do +135 °C). Desky s plného polykarbonátu mají výhodu v tom, že mají vynikající mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti. Plný polykarbonát je při normálním používání praktický nerozbitný. [19]

Použití

Obklady fasád, zastřešení teras, výroba zimních zahrad a skleníků, vnitřních stropů, světlíků a světelných pásů. Také má uplatnění ve sportovních halách, k výrobě pergol a zastřešení pasáží, stavbě obchodů a veletrhů a při výrobě reklamních panelů a vývěsních štítů. Polykarbonát je také hodně používán i v oboru designu interiérového nábytku. Také se polykarbonát využívá pro výrobu optických médií (DC, DVD), elektroniky, světel do automobilů, interiérů letadel nebo medicínských nástrojů (možnost sterilizace). [20]

Vlastnosti

Vysoká mechanická pevnost při nastalých nízkých i vysokých teplotách (-40 °C až +135 °C), vynikající tepelně izolační a elektricky izolační vlastnosti, dobrá světelná propustnost a odolnost proti povětrnostním vlivům, příznivé protipožární technické vlastnosti, vysoká tvarová stálost vůči teplu, bezproblémové zpracování a velmi nízká hmotnost. [20]

3.2.5 Polypropylen (PP)

Tento plast je jeden z mnoha ekonomicky hlavních termoplastických materiálů. Polypropylen se používá ve velmi velké škále aplikací, kde buď průhledný, nebo zbarvený pigmenty, jako jsou obaly na potraviny, tkaniny, automobilové součásti, lékařské přístroje a spotřební zboží. Vlastnosti polypropyleny jsou dány použitou polymerací a použitými katalyzátory. [21], [22]

Vlastnosti

Tento plast je podobný fyzikálně-chemickým vlastnostem jako má polyetylen. Křehne při teplotách, které jsou nízké, kolem 140 – 150 °C měkne, kolem 160 – 170 °C se taví. Je odolný vůči olejům, organickým rozpouštědlům a alkoholům, dobře se rozpouští v xylenech či tetrahydronaftalenu. Polypropylen má velmi dobrou chemickou a mechanickou odolnost. [22]

Použití

Polypropylen se často používá pro výrobu lan a provazů kvůli jeho hmotnosti, kterou má velmi nízkou.

Polypropylen se také používá jako možnost k polyvinylchloridu (PVC) pro izolaci elektrických kabelů, převážně tam kde se větrá málo. Polypropylen při hoření neprodukuje hodně kouře a žádné toxické halogen-uhlovodíky, které za vyšších teplot by mohly přispět ke vzniku různých kyselin. [21], [22]

3.2.6 Polyoxymetylén (POM)

Polyoxymetylén (POM), který známé jako polyacetal nebo acetal, byl nalezen německým chemikem Herman Staudingerem. [23]

Polyoxymetylény se dělí do dvou skupin:

- homopolymer POM
- kopolymer POM

S využitím prvotního metanolu je vytvořen formaldehyd a poté je vytvořen POM homopolymer, pokud to ale přijde k přímé polymeraci. Pro POM kopolymer je formaldehyd doveden na trioxan a ten je polymerizován společně s co-monomerem na kopolymer POM .

Homopolymer POM má dosti vysokou krystalinitu v porovnání s kopolymerem POM. Na druhou stranu má kopolymer vyšší chemickou odolnost. To vede k vyšší tuhosti homopolymeru a k menší tepelné degradaci kopolymeru POM při výrobě i během používání. [23]

Vlastnosti

- vysoká tuhost
- nízké opotřebení
- dobrá pružnost
- nízká nasákavost vody

Použití

- ozubená kola
- pružiny
- řetězy
- šrouby
- rukojeti
- zipy
- svorky
- palivová čerpadla
- inhalátory
- nábytkové kluzáky [23]

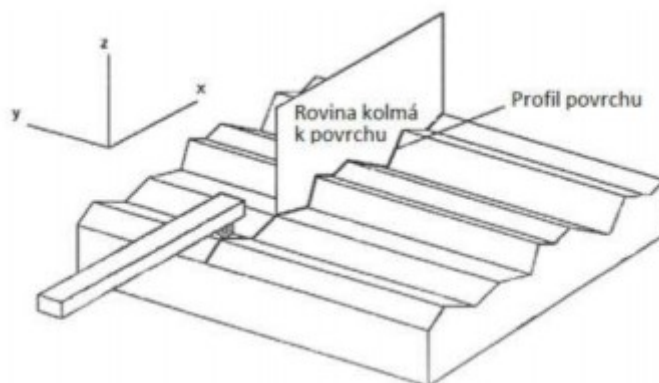
4 Metody měření povrchu

V této kapitole se budu zabývat klasifikací měřicích metod z ohledu na jejich princip měření a následným hodnocením jejich výhod a nevýhod. Budu porovnávat metody optického měření s měřením mechanickým pro materiál plast.

4.1 Drsnost povrchu

Na základě funkčnosti ploch je na povrch výrobku kladen určitý požadavek drsnosti. Drsnost povrchu velmi výrazně ovlivňuje spolehlivost a životnost součástí. Závisí na ní přesnost chodu strojních součástí, odolnost proti opotřebení, únavová pevnost, ztráty třením apod. Proto je nezbytně nutné drsnost povrchu kontrolovat a optimalizovat pomocí změn ve výrobě.

Po technologické operaci vznikají na povrchu nerovnosti, které představují prostorový útvar, který lze velmi obtížně posoudit. Problémem posuzování drsnosti se řeší redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu (obr. 5). V rovině řezu se získá profil, který je hlavním zdrojem informací pro vyhodnocení struktury povrchu. [25], [26], [27]



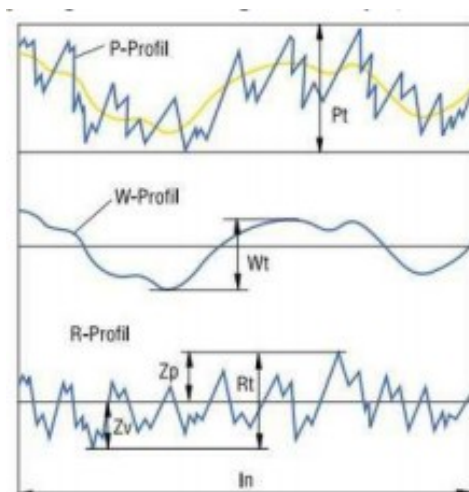
Obr. 5 Profil povrchu [25]

Nerovnost povrchu je členěna podle velikosti rozteče příslušných nerovností na jednotlivé složky:

- drsnost povrchu – složka s nejmenší roztečí,
- vlnitost povrchu,
- tvar povrchu – složka s největší roztečí nerovností určenou základním profilem.

Dle normy ČSN EN ISO 4287 lze definovat následující geometrické parametry (obr. 6):

- P – parametr: parametr, který je vypočítán ze základního profilu,
- W – parametr: parametr, který je vypočítán z profilu vlnitosti,
- R – parametr: parametr, který je vypočítán z profilu drsnosti.



Obr. 6 Geometrické parametry struktury povrchu [24]

Základní délka drsnosti l_r – délka ve směru osy x použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil drsnosti (obr. 7).

Vyhodnocovaná délka l_n – je délka ve směru osy x použitá pro hodnocení posuzovaného profilu (obr. 7). [25], [26], [27]



Obr. 7 Základní a vyhodnocovací délka drsnosti [24]

Definování některých charakteristik [25]:

Základní délka l – délka ve směru osy x , použitá pro rozpracování nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil.

Výška posuzovaného profilu v libovolné poloze $x - Z(x)$.

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad [\mu m]$$

nebo

$$Ra = \frac{1}{l_p} \int_0^{l_p} |y(x)| dx \quad [\mu m]$$

vysvětlení zkratk: l_p - měřená délka [m]

$y(x)$ – je to funkce, která popisuje profil [-]

$y(x_i)$ – souřadnice n bodů profilu povrchu v mezích [-] měřené délky,

$i = 1, 2, 3, \dots, n \dots$ [26], [27]

4.2 Metody měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti můžeme rozdělit na dva základní typy, na kvalitativní a kvantitativní. [26], [27], [28]

Metody kvalitativní jsou založeny na zkoumání kontrolovaného povrchu s povrchem etalonovým, čím známe jeho drsnost. Porovnávat můžeme pouze povrchy opracované stejným nebo alespoň podobným způsobem obrábění a výsledkem je zjištění, že kontrolovaná plocha je hladší nebo hrubší než plocha vzorová, resp. že její drsnost se pohybuje mezi drsnostmi dvou vzorků po sobě následujících např. 0,8 až 1,6 μm . K porovnání

slouží vzorkovnice drsnosti povrchu. Jsou obrobeny různými druhy opracování v různých stupních drsnosti.

Metody kvantitativní vyjadřují drsnost povrchu číselně a to v parametrech Ra, Rz resp. Rz DIN. Hodnoty nerovností tvořících příčnou drsnost měříme elektronickým komparačním délkoměrem EDK. Komparátor je ve snímači osazen safírovým hrotem s velmi malým vrcholovým poloměrem $R = 2 - 20 \mu\text{m}$, neboť při větších poloměrech by došlo ke značnému zkreslení profilu. Příliš malé zaoblení však také není možné, neboť by velmi vzrostl kontaktní tlak mezi hrotem a povrchem. Podélný pohyb kontrolované součásti zajišťuje hlavička s mikrometrickým šroubem. Při podélném pohybu součásti je vzhledem k nebezpečí otupení safírového hrotu nutno snímač nadzdvihnout. [26], [27], [28]

Dotykové měřicí přístroje – měření se zakládá na rovnoměrném posouvání měřicího hrotu, který má malé zaoblení, po zkoumaném povrchu kontrolujícího vzorku. Také je možné posunovat kontrolující vzorek pod měřicím hrotem. Změna výšky je zaznamenána v několikanásobném zvětšení a následně vyhodnocena. Změny můžeme zaznamenávat ve formě profilografů nebo jsou přesunuty na analogové změny napětí a indukčnosti. Snímání povrchu lze provést jako absolutní, nebo relativní. Nejpoužívanější dotykové měřicí přístroje jsou s mechanickým převodem, elektromagnetické, elektrodynamické a induktivní. Jejich výhodou je vysoká přesnost, citlivost a opakovatelnost měření. Nevýhodou je poškození povrchové vrstvy, protože měřicí hrot je vyroben z tvrdého materiálu. [26], [27], [28]

Bezdotykové měřicí přístroje – měření se zakládá na promítnutí světelného paprsku na zkoumaný povrch. Paprsek se od zkoumaného povrchu odrazí nazpět nebo se rozptýlí. Výhodou těchto přístrojů je fakt, že měřicí přístroje nepřicházejí do styku se zkoumaným vzorkem a díky tomu nedojde k poškození vzorku. Další výhodou je, že měřicí hrot nepotřebuje korekci a je možné měřit i větší plochy. Nevýhodou těchto přístrojů je skutečnost, že může docházet k tzv. ztrátě dat. Ke ztrátě dat může docházet v místech s náhlou změnou profilu nebo v hraničních oblastech. Ztráta dat je zapříčiněna tím, že se paprsek neodrazí tak jak by měl zpět do detektoru a ten nezapiše žádná data. Ke ztrátě dat může dojít i při měření ploch s nízkou odrazivostí. Bezdotykové měřicí přístroje jsou vyrobeny k měření měkkých a citlivých povrchů, kde by mohlo dojít k poškození od dotykového zařízení. [26], [27], [28]

Ostatní měřicí přístroje – v této skupině jsou napsány další metody, které nejsou uvedené výše. Metoda AFM (atomic force microscopy) využívá miniaturního ostrého hrotu, jehož miniaturní konstantní přitlačná síla (10^{-9} N) na plochu je vyvozena piezoelektrickým článkem. Proti přitlačné síle hrotu působí meziatomární síla zkoumaného vzorku a důsledkem nerovností povrchu je hrot vychylován. [26], [27], [28]]

Metoda SEM (scanning electron microscopy) – tato metoda je založena na vzájemném působení dopadajících elektronů a materiálu vzorku. Povrch vzorku některé elektrony pohltí a některé odrazí zpět do detektoru, kde se mění úroveň signálu. Signál je následně vyhodnocen. [26], [27], [28]

4.3 Mechanické metody

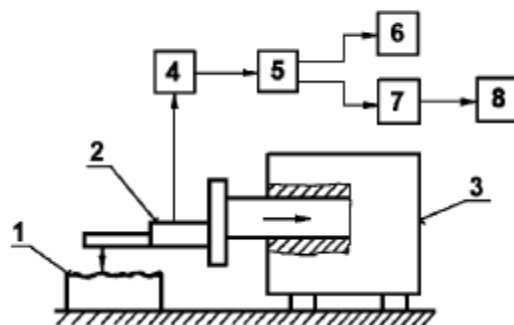
Tyto metody jsou dosud nejrozšířenějšími metodami, nejvíce ve strojírenském průmyslu. Touto metodou lze převést analogový záznam do digitální podoby a lze vyhodnocené hodnoty vzít jako vztažné a srovnávací hodnoty pro další metody měření.

Výhodou je možnost zobrazit zkoumaný geometrický profil opakovaně nebo stejně. U plastů se může stát, že dotyková měřicí metoda se vyloučí z důvodu velkých rozměrů snímacích prvků a nadměrně velkých snímacích sil, díky tomu je optické měření stále jako základní možná cesta ke kontrolování rozměrů. [29], [30], [31]

V současnosti firmy vyžadují rychlou kontrolu kvality, nejlépe přímo v automatizovaném výrobním procesu, ale to jde jenom bezkontaktně. Tyto požadavky nemůžou být splněny u doposud používaných mechanických systémů.

Dotykový profilometr (obr. 8) je složen ze dvou částí, a to z mechanické a z elektrické. Základním principem je, změna polohy měřicího hrotu, který převádí snímač na analogové změny elektrického napětí. [29], [30], [31]

- 1 – měřená součást
- 2 – snímací hlavice s hrotem
- 3 – posuvný mechanismus
- 4 – zesilovač
- 5 – filtr
- 6 – registrační jednotka
- 7 – jednotka, která zpracovává signál
- 8 – zobrazovací jednotka



Obr. 8 Schéma dotykového profilometru [33]

4.3.1 Porovnání mechanických metod [30]

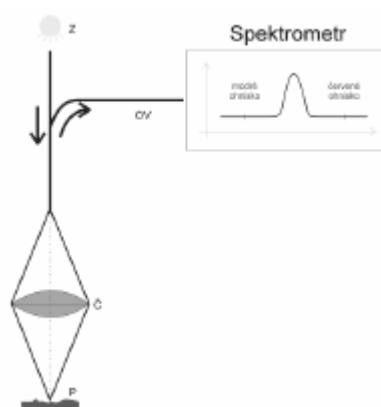
Výhody	Nevýhody
měření povrchů	destrukce povrchů u měkkých materiálů
velká rozlišovací schopnost	pouze 2D měření
přímé měření parametrů topografie povrchu	relativně pomalý pohyb hrotu po měřeném povrchu
možná kalibrace výsledků z nepřímých metod vzhledem k přímému měření	chybějící kontinuální kontrola a řízení kvality povrchu
zkoumá materiál i přes olejové skvrny	není možné dálkově řídit
jednoznačně definované ISO standardy a povrchy	nadměrná selektivnost získaných informací

4.4 Optické metody

Jedná se o bezdotykové a nedestruktivní měření, které nepřímo kopíruje povrch vzorku světelným paprskem, aniž by se muselo povrchu dotýkat, třeba jak u mechanického profilometru. Tyto metody se využívají k měření mikrostruktury povrchu [32]. Princip optické metody je zřízen na interakci světla a povrchu. Na zkoumané těleso je promítán světelný svazek, který po odrazu od zkoumaného tělesa prochází zpět zobrazovací soustavou a dopadá na detektor (CCD kamera). Vzájemné působení mezi světelným paprskem a povrchem závisí na vlnové délce světla, drsnosti povrchu a na vlastnostech měřeného vzorku. Pak je zpracování signálu a vyhodnocení výsledků. [32]

4.4.1 Optický profilometr MicroProf FRT

Bílé světlo ze zdroje **z** je optickým vláknem **ov** přivedeno ke spojné čočce **č**. Po spadnutí na měřený povrch tělesa je fokusované světlo optimálně odraženo zpět do spojné čočky a optickým vláknem přivedeno do miniaturního spektrometru. [33]



Obr. 9 Ukázka optického profilometru [33]

4.4.2 Konfokální mikroskopie

Konfokální mikroskop je typem optického mikroskopu, který má výhodu, že má vyšší rozlišovací schopnost danou detekcí světla pouze z ohniskové roviny mikroskopu. [34]

Tyto mikroskopy rozdělujeme na [34]:

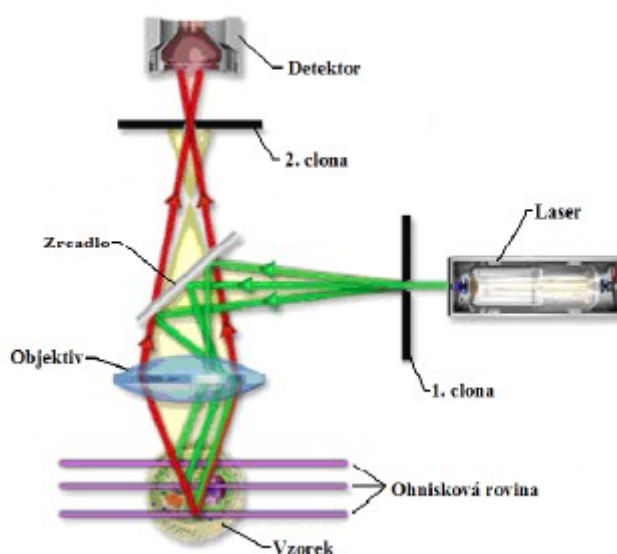
- laserové rastrující konfokální mikroskopy,
- konfokální mikroskopy s rotujícím diskem.

Laserový rastrovací konfokální mikroskop

Marvin Minsky byl prvním vynálezcem konfokálního mikroskopu, který pocházel z USA, a nechal si ho patentovat v roce 1957. V tomto roce neměl uplatnění, neboť nenalezl přijatelný zdroj světla. Až koncem 70. let byl vyroben první laserový konfokální mikroskop [35], [36]. Principem konfokálního mikroskopu, že netvoří obraz vcelku, ale bod od bodu, řádkováním. Měřené těleso je řádkovacím způsobem postupně osvětlováno laserem, paprsek je fokusován na clonu, zrcadlo a dále přechází přes objektiv (obr. 10). Odražené, rozptýlené záření je totožným objektivem zobrazeno na druhou clonu a do detektoru. Detektorem může být fotonásobič či lavinová dioda. Konfokální obrazy optických řezů vznikají v číselné podobě, a můžeme je dále upravovat všemi různými způsoby počítačového zpracování obrazů. [34], [36], [37]

Metody rastrování [36]:

- cestou rozmítání laserového paprsku,
- příčným posouváním vzorku před objektivem,
- posouváním objektivu nad vzorkem.



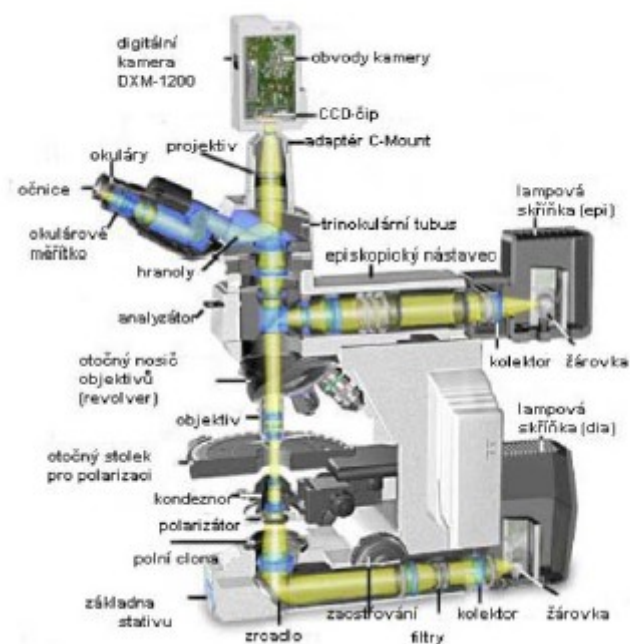
Obr. 10 Ukázka rastrovacího konfokálního mikroskopu [35]

4.4.3 Polarizační mikroskop

Mikroskop je vystrojen polarizačním zařízením, které je složeno z polarizátoru a analyzátoru. Princip je v tom, že ve snímání sekvence obrazů zkoumaného povrchu při odlišném zaostření a v jejím následném softwarovém zpracování (obr. 11) [32].

Polarizační mikroskopie používá vlastnosti světla, kterému říkáme polarizace. Tuto mikroskopickou techniku využijeme při pozorování neprůhledných objektů. [38]

Hranoly v tubusu dělí chod paprsků do okulárů nebo do výstupu pro kameru. Na stativu je osvětlovací nástavec s lampovou skříňkou pro episkopické osvětlení. Mikroskop je vybaven pro polarizační měření. V optické ose je polarizační analyzátor a kondenzor s polarizátorem. Stolek je otočný se stupnicí v úhlové míře s noniem. Diaskopické osvětlení, vestavěné do stativu, je vybaveno kolektorem, filtry a polní clonou. Z pohledu je levý zaostřovací systém zakryt, vidíme jen jeho pravou část. [38]



Obr. 11 Ukázka optického polarizačního mikroskopu [1], [32]

Porovnání optických metod [32]

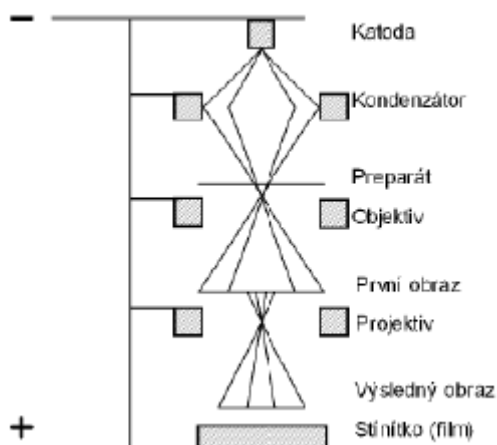
Výhody	Nevýhody
bezkontaktnost a nedestruktivnost	nepřímé měření parametrů topografie povrchu
okamžité výsledky	složitější interpretace výsledků
schopnost kontinuální kontroly a řízení kvality povrchu	ztížená korelovatelnost na normované parametry
opakovatelnost měření	
možnost měření z větší vzdálenosti	
velká rychlost snímání	

4.5 Jiné metody

Máme celou řadu metod měření charakteristik drsnosti povrchu, které používají jiný princip než je mechanický nebo optický. Uvedu jen několik známějších metod, mezi kterými je elektronová mikroskopie (SEM, TEM) či mikroskopie s rastrující sondou (STM, AFM, MFM) a další metody.

4.5.1 Metoda transmisní elektronové mikroskopie TEM

Mikroskop i se vzorkem musí být ve vakuu, protože ve vzduchu by mohlo docházet k pohlcování elektronů [40], [41]. Princip TEM je ukázán na obr. 12. Zdrojem elektronů je kovová katoda, která po rozžhavení vysílá proud urychlených elektronů elektrickým polem o napětí 50 až 220 kV. Elektrony prochází elektronovou čočkou, která je tvořena elektrickým polem kondenzátoru nebo magnetickým polem cívky. Paprsek prochází čočkou na vzorek (preparát) a poté na další čočku a vytvoří obraz. Část obrazu se čočkou zvětší a výsledný obraz se promítne na fluorescenční stínítko či obrazovku. Díky nim lze proud elektronů zviditelnit, protože výsledný obraz nelze pozorovat přímo okem. [32], [39], [40],



Obr. 12 Transmisní elektronový mikroskop [40], [39]

4.5.2 Metoda rastrovací elektronové mikroskopie SEM

Těleso může být velké, pokud je vodivé. Nevodivé tělesa je nutné udělat vodivými, např. napařením kovu nebo uhlíku [39], [40]. SEM pracuje tak, že na vzorek dopadá velmi úzký svazek elektronů vysílaných kovovou katodou (obr. 13), který pomocí vychylovacího zařízení přejíždí postupně všechna místa vzorku (preparátu). Dopadající elektrony se rozptylují do okolí a mohou vyřážet elektrony z povrchu vzorku. Odražený paprsek je detekován pomocí senzoru citlivého na elektrony a signál se převádí do softwaru počítače a zviditelňuje na jeho obrazovce. [1], [39], [40]



Obr. 13 Rastrovací mikroskop [1], [39], [40]

5 Experimentální část

5.1 Řezání vzorků

Pro experiment byl použit laser E4060, který vlastní škola. Díky tomuto stroji jsem byl schopen nařezat vzorky pro další experimentální část.

Laser je vhodný pro výrobu reklamních předmětů (navigační cedule, nejrůznější štítky, výrobky z kůže a dřeva, firemní razítka). [41]

Argumenty

- Laser E4060 je vybavený CO₂ trubicí, což jej předurčuje pro gravírování všech materiálů, které nejsou z kovu, např. plasty, kůže, dřevo, sklo, keramika, plexisklo.
- Při gravírování kovů je nutné použít speciální pastu.
- Pomocí krokového motoru je možné výškově nastavit stůl a to v rozsahu od 0- 280 mm
- Na obráběnou plochu přiváděn paprsek pomocí tří odrazových zrcátek a speciální čočky.
- Pro nastavení kolmosti paprsku je přidáno seřizovatelné zrcátko.
- Laserový paprsek způsobuje nevratný popis materiálu. [41]

5.1.1 Technická data [41]

Technický parametr	Hodnota
Min. rozměry gravírované plochy	1,5 × 1.5 mm
Max. rozměry gravírované plochy	400 × 600 mm
Možnost gravírování rotačních těles	ano
Výkon laseru	40 W
Typ laseru	CO ₂
Životnost laserové trubice	4000 hod.
Rychlost gravírování	0 – 1000 mm/s
Řezná rychlost	0 – 600 mm/s
Max. hloubka řezu	Akryl 0 – 10 mm
Pohony os	krokové motory
Opakovatelná přesnost	0.01 mm
Chlazení vodou	ano

Podporovaný software	ArtCut, CorelDraw, PhotoShop, AutoCAD
Podporované grafické formáty	PLT, DXF, BMP, JPG, GIF, PGN, TIF
Komunikační rozhraní	USB
Celkový příkon	1200 W
Elektrické připojení	230 V
Pracovní výška	0 – 280 mm
Rozměry	1370 × 950 × 1050 mm
Hmotnost	180 kg



Obr. 14 Gravírovací a řezací CO₂ laser [41]

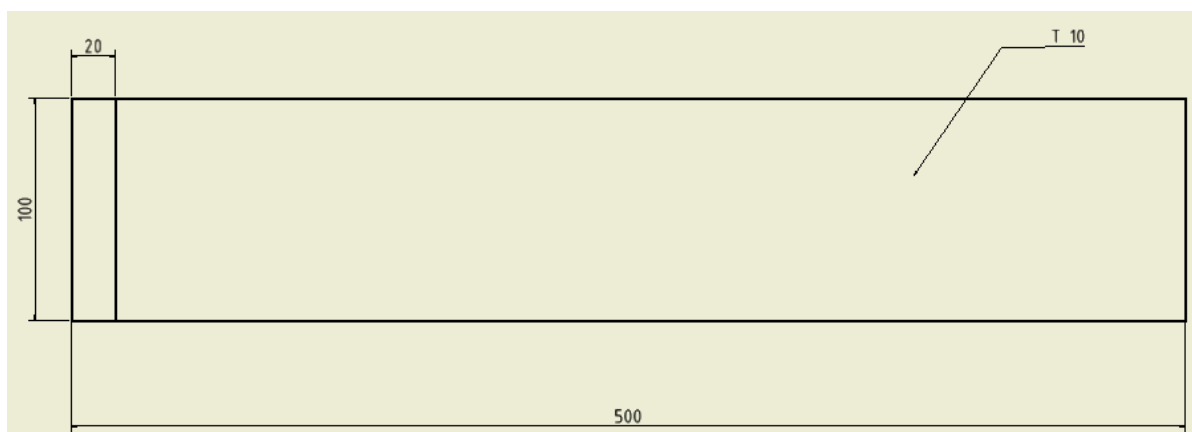
5.1.2 Možnosti řezání vzorků

Pro experiment byly použity tři druhy materiálů, na kterých se postupně měnily podmínky řezání.

Použité materiály:

- 1) Polypropylen PPC natur
- 2) Plexiglas XT (Plexisklo)
- 3) Polyamid PA6

Experiment se prováděl na deskách, které měly rozměry 500x100x10 mm. Prováděl se řez příčně a jeho šířka byla pokaždé 20 mm.



Obr. 15 Ukázka rozměrů desky pro experiment

Podmínky řezání vzorků

Pro experiment se měnily dvě podmínky, jimi byly rychlost řezání [f] a výkon stroje [P].

Jelikož nebylo možné některý materiál rozřezat určitou rychlostí, tak se to trochu mění v porovnání s dalšími materiály.

Plexisklo (Plexiglas XT)												
Rychlost [mm/s]	1	2	5	10	1	2	5	10	1	2	5	10
Výkon [%]	100	100	100	100	75	75	75	75	50	50	50	50

Tab. 1 Podmínky řezání Plexiskla

V tabulce 1 můžeme vidět, že tento stroj je schopen přerézat materiál při těchto podmínkách.

Polyamid PA6											
Rychlost [mm/s]	1	2	5	10	1	2	5	10	1	2	5
Výkon [%]	100	100	100	100	75	75	75	75	50	50	50

Tab. 2 Podmínky řezání Polyamidu

V této tabulce můžeme vidět, že oproti plexisklu je zde uvedena jen rychlost řezání do 5 mm/s při 50 % výkonu. Je to způsobeno tím, že stroj nebyl schopen přerézat materiál při vyšších rychlostech. Také docházelo při řezání k tavení materiálu.

Polypropylen PPC natur											
Rychlost [mm/s]	1	2	5	10	1	2	5	10	1	2	5
Výkon [%]	100	100	100	100	75	75	75	75	50	50	50

Tab. 3 Podmínky řezání Polypropylenu

V této tabulce můžeme vidět, že oproti plexisklu je zde uvedena jen rychlost řezání do 5 mm/s při 50 % výkonu, ale tyto podmínky jsou totožné s podmínkami řezání Polyamidu. Tyto podmínky jsou způsobeny tím, že stroj nebyl také schopen přerušit materiál při vyšších rychlostech. Při řezání docházelo k tavení materiálu a při nižších rychlostech při řezání docházelo k jeho následnému spojení.

5.2 Měření drsnosti

5.2.1 Hommel-Etamic W5

HOMMEL-ETAMIC W5 je velmi výkonný přenosný přístroj na měření drsnosti povrchu a představuje pohodlí všem uživatelům. Snadný design z něj činí naprosto lehký nástroj ke každodennímu užívání, který si vezmeme bezpečně a s jistotou do každé ruky všude tam, kde nacházíme požadavek na měření přístrojem. [42]



Obr. 16. Drsnoměr Hommel-Etamic W5 [42]

Vyhodnocované parametry [42]

DIN EN ISO 4287	DIN EN ISO 4287: Ra, Rz, Rmax, Rt, Rq, RSm, Rmr(c), RSK
DIN EN ISO 13565:	Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2
MOTIF ISO 12085	R, Rx, AR
ASME B46	Rp, Rpm
JIS B601	Rz-JIS, Ry (odpovídá Rz), tp (odpovídá Rmr)
celková dráha měřeného úseku Lt:	až 17,5 mm
dráha měřeného úseku dle ISO/JIS:	1,5 / 4,8 / 15 mm
	>0,64 / 3,2 / 16 / mm
volně volitelné normované délky (cut-off):	0,25 / 0,8 / 2,5 mm
měřicí rozsah snímače/rozlišení:	320 μm (-210/+110) / 0,01 μm
Pojezdová rychlost:	0,15 / 0,5 / 1 / mm/sec, návrat 3 mm/sec

Tab. 4. Přehled parametrů drsnoměru

5.2.2 Měření a vyhodnocení drsnosti

Měření drsnosti se provádělo přístrojem Hommel-Etamic W5. Měření probíhalo tak, že pro každý materiál a každou rychlost řezání se vyhodnotily výsledky, a to parametr Ra, Rz a směrodatná odchylka. Měření každého řezu se opakovalo třikrát. Nakonec se z každého měření udělala průměrná hodnota.

5.2.2.1 Tabulky naměřených a vyhodnocených hodnot

	Ra [μm]	Rz [μm]
f=1, P=100% plexisklo	0,1 \pm 0,01	0,3 \pm 0,5
f=1, P=75% plexisklo	0,2 \pm 0,01	0,6 \pm 0,11
f=1, P=50% plexisklo	0,2 \pm 0,004	0,8 \pm 0,01
f=1, P=100% polyamid	1,9 \pm 0,12	12,4 \pm 1,20
f=1, P=75% polyamid	1,7 \pm 0,20	9,8 \pm 1,25
f=1, P=50% polyamid	10,4 \pm 0,30	55,4 \pm 2,50
f=1, P=100% polypropylen	14,8 \pm 0,38	67,8 \pm 2,98
f=1, P=75% polypropylen	4,7 \pm 0,12	29,5 \pm 0,54
f=1, P=50% polypropylen	14 \pm 0,33	59,8 \pm 0,80

Tab. 5. Naměřené a vyhodnocené parametry drsnosti pro rychlost řezání f=1

	Ra [μm]	Rz [μm]
f=2, P=100% plexisklo	0,1 \pm 0,003	0,5 \pm 0,04
f=2, P=75% plexisklo	0,2 \pm 0,005	0,8 \pm 0,03
f=2, P=50% plexisklo	0,3 \pm 0,01	0,9 \pm 0,05
f=2, P=100% polyamid	1,1 \pm 0,09	6,1 \pm 0,44
f=2, P=75% polyamid	1,7 \pm 0,13	10,9 \pm 0,89
f=2, P=50% polyamid	12,4 \pm 0,48	58 \pm 1,27
f=2, P=100% polypropylen	1,2 \pm 0,01	7 \pm 0,46
f=2, P=75% polypropylen	2,8 \pm 0,03	17 \pm 1,31
f=2, P=50% polypropylen	13,4 \pm 0,51	57 \pm 0,74

Tab. 6. Naměřené a vyhodnocené parametry drsnosti pro rychlost řezání f=2

	Ra [μm]	Rz [μm]
f=5, P=100% plexisklo	0,5 \pm 0,03	1,8 \pm 0,13
f=5, P=75% plexisklo	0,3 \pm 0,01	1,3 \pm 0,02
f=5, P=50% plexisklo	0,7 \pm 0,11	2,7 \pm 0,46
f=5, P=100% polyamid	1,5 \pm 0,14	11 \pm 1,42
f=5, P=75% polyamid	1,2 \pm 0,08	8,1 \pm 0,79
f=5, P=50% polyamid	10,4 \pm 2,56	50,9 \pm 14,71
f=5, P=100% polypropylen	1,2 \pm 0,001	4,7 \pm 0,04
f=5, P=75% polypropylen	1 \pm 0,16	4,2 \pm 0,18
f=5, P=50% polypropylen	1,2 \pm 0,02	5,7 \pm 0,07

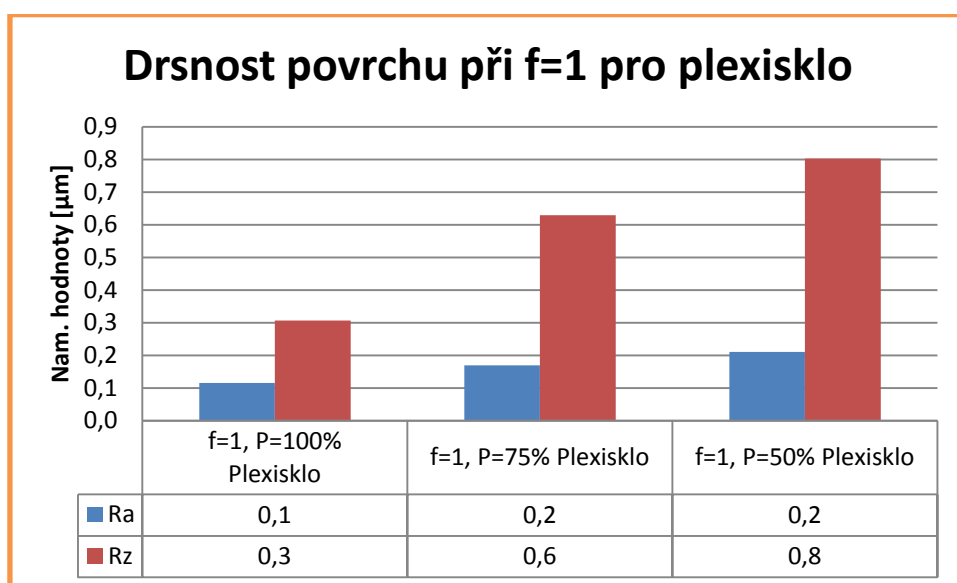
Tab. 7. Naměřené a vyhodnocené parametry drsnosti pro rychlost řezání f=5

	Ra [μm]	Rz [μm]
f=10, P=100% plexisklo	1,5 \pm 0,04	5 \pm 0,19
f=10, P=75% plexisklo	1,5 \pm 0,05	6 \pm 0,24
f=10, P=50% plexisklo	0,6 \pm 0,004	4,4 \pm 0,41
f=10, P=100% polyamid	2,2 \pm 0,12	9,8 \pm 0,75
f=10, P=75% polyamid	2,3 \pm 0,05	12,7 \pm 0,60
f=10, P=100% polypropylen	0,8 \pm 0,11	3,9 \pm 0,66
f=10, P=75% polypropylen	1,5 \pm 0,04	7,5 \pm 0,81

Tab. 8. Naměřené a vyhodnocené parametry drsnosti pro rychlost řezání f=10

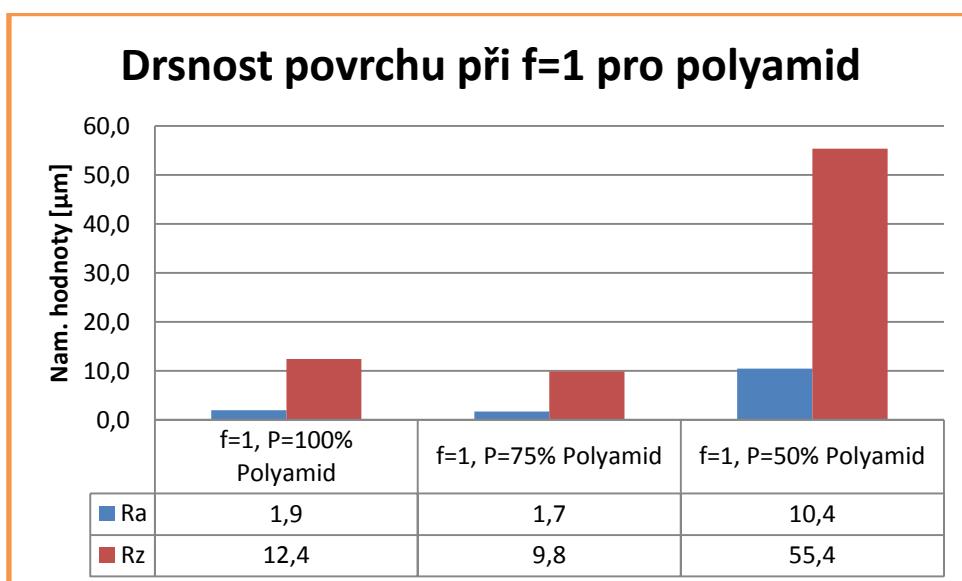
V tabulkách 5–8 můžeme vidět průměrné hodnoty naměřených hodnot a jejich směrodatnou odchylku, které se vztahují k určitým druhům materiálů pro různé parametry řezání. Parametry řezání se měnily pro rychlost řezu od 1 do 10 mm/s a pro výkon řezu od 100 do 50 % výkonu. V tabulkách 5–8 jsou vyhodnoceny parametry Ra a Rz a jejich směrodatná odchylka, které se měřily přístrojem Hommel-Etamic W5.

5.2.2.2 Grafy vyhodnocených hodnot pro $f=1$



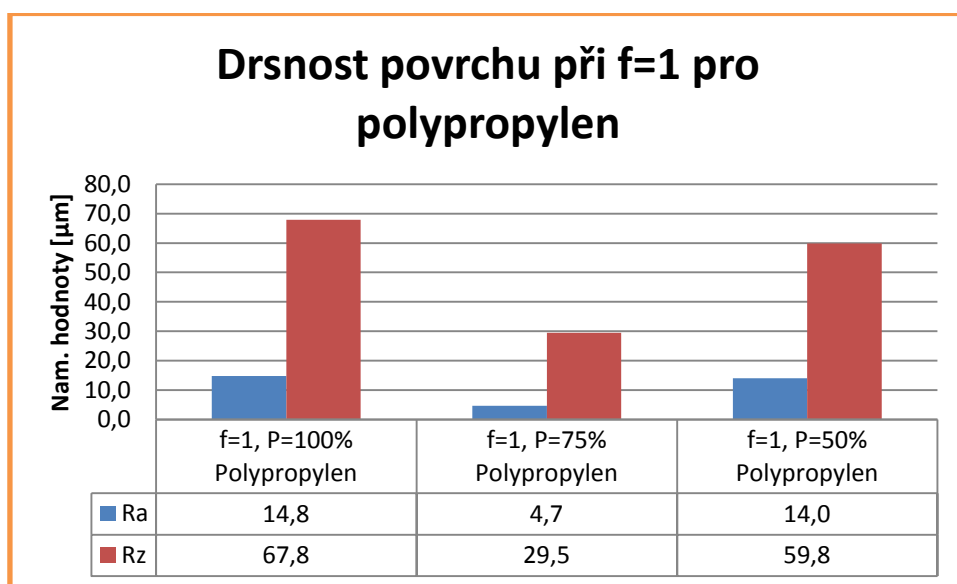
Graf 1. Graf drsnosti povrchu při $f=1$ pro plexisklo

V grafu č. 1 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 1 mm/s a výkon stroje od 100 % do 50 % pro materiál plexisklo se moc výrazně od sebe neliší drsnost neboli parametr Ra. Drsnost povrchu je hladká a je to dáno tím, že působí při řezání na povrchu teplo laseru a při vlastnostech materiálu se díky tomu materiál zahlučuje. Parametr Rz nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 100% výkon. Je to dáno tím, že rychlost řezu je velmi malá, tudíž na řeznou plochu působí delší dobu teplo paprsku.



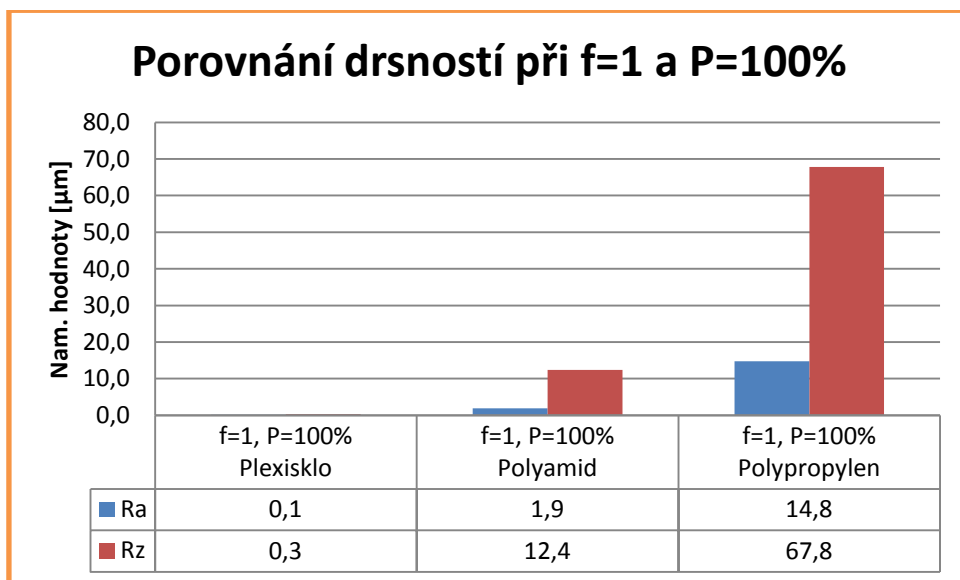
Graf 2. Graf drsnosti povrchu při $f=1$ pro polyamid

V grafu č. 2 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 1 mm/s a výkon stroje od 100 % do 50 % pro materiál polyamid se moc výrazně od sebe neliší drsnost neboli parametr Ra, až na zvolené parametry řezu ($f=1$, $P=50\%$) u kterého drsnost povyskočila až na hodnotu $10,4\text{ }\mu\text{m}$. Drsnost povrchu je hladká a je to dáno tím, že působí při řezání na povrchu teplo laseru. U zvoleného parametru ($f=1$, $P=50\%$) vyšla daná drsnost takto, jelikož řezaná část při řezu se začala k sobě spékat dohromady, a tudíž na přeřezání vzorku musel být použit další řez, který materiál oddělil od sebe. Parametr Rz nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 75% výkon. Je to dáno tím, že rychlost řezu je velmi malá a výkon stroje je optimální pro řezání tohoto materiálu danými parametry.



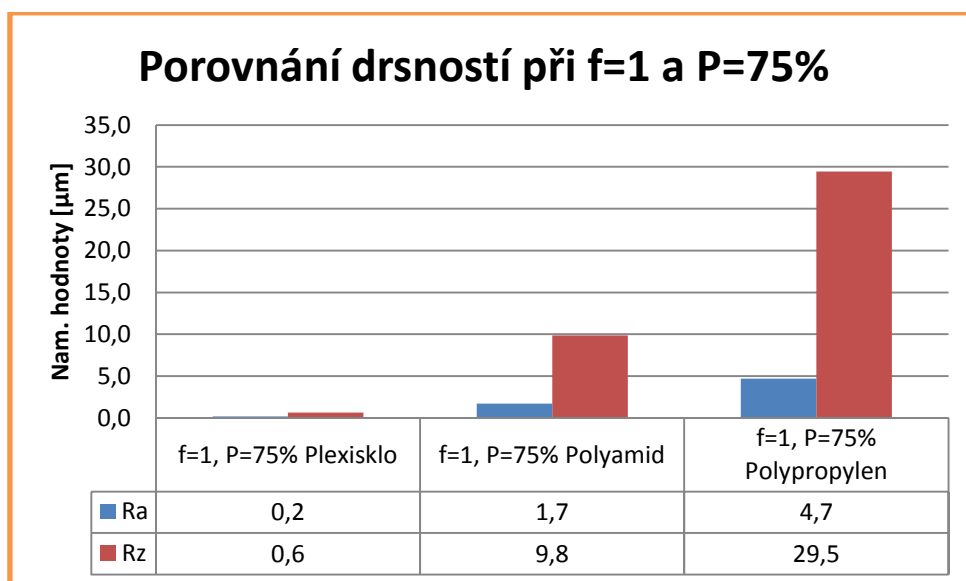
Graf 3. Graf drsnosti povrchu při $f=1$ pro polypropylen

V grafu č. 3 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 1 mm/s a výkon stroje od 100 % do 50 % pro materiál polypropylen se výrazně od sebe liší drsnost neboli parametr Ra. Nejlépe vychází vzorek č. 2 neboli parametry ($f=1$, $P=75\%$), jelikož zvolené parametry jsou pro řez neadekvátnější. Při zvolených parametrech řezu ($f=1$, $P=100\%$ a $f=1$, $P=50\%$) drsnost povyskočila až na hodnotu $14,8\text{ }\mu\text{m}$, respektive $14\text{ }\mu\text{m}$. Tato drsnost je dána tím, že při zvolených parametrech paprsek přeřezal materiál, ale nechal za sebou viditelné stopy řezu. Materiál se při řezu lehce stékal dohromady, ale bylo možné jej od sebe oddělit, tudíž díky tomu vyšel parametr Ra tak vysoký. Parametr Rz nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 75% výkon. Je to dáno tím, že rychlost řezu je velmi malá a výkon stroje je optimální pro řezání tohoto materiálu danými parametry.



Graf 4. Porovnání drsnosti povrchu při $f=1$ a $P=100\%$

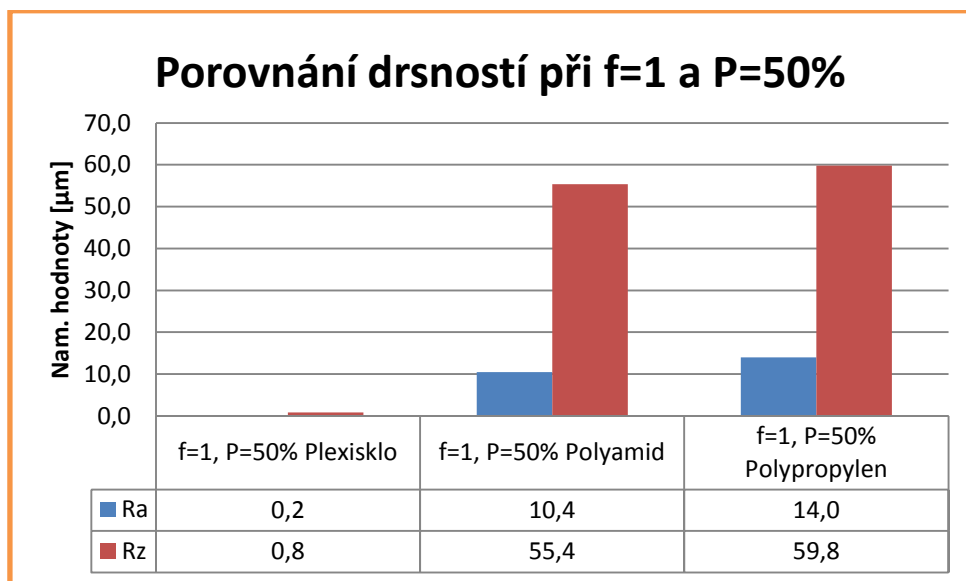
V grafu č. 4 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 1 neboli plexisklo. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem. Také ale moc nezaostává materiál z polyamidu, který se při těchto zvolených podmínkách chová výborně. Nejhuře dopadl materiál z polypropylenu, který má nejhorší vlastnosti pro řezání laserem.



Graf 5. Porovnání drsnosti povrchu při $f=1$ a $P=75\%$

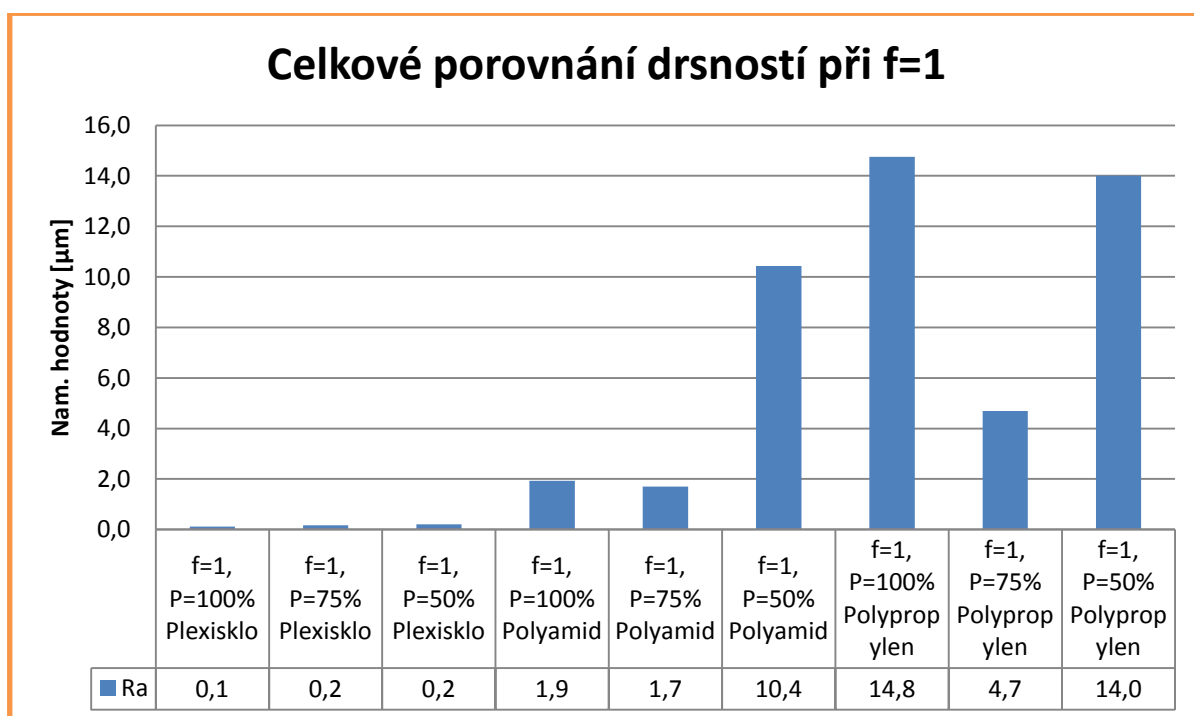
V grafu č. 5 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 1 neboli plexisklo. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem. Také ale moc nezaostává materiál z polyamidu, který se při těchto zvolených podmínkách chová výborně. Nejhuře dopadl materiál z polypropylenu, který má nejhorší

vlastnosti pro řezání laserem, ale při těchto zvolených podmínkách je jeho drsnost nižší než 5 μm , což znamená, že tyto podmínky jsou pro tento materiál vyhovující.

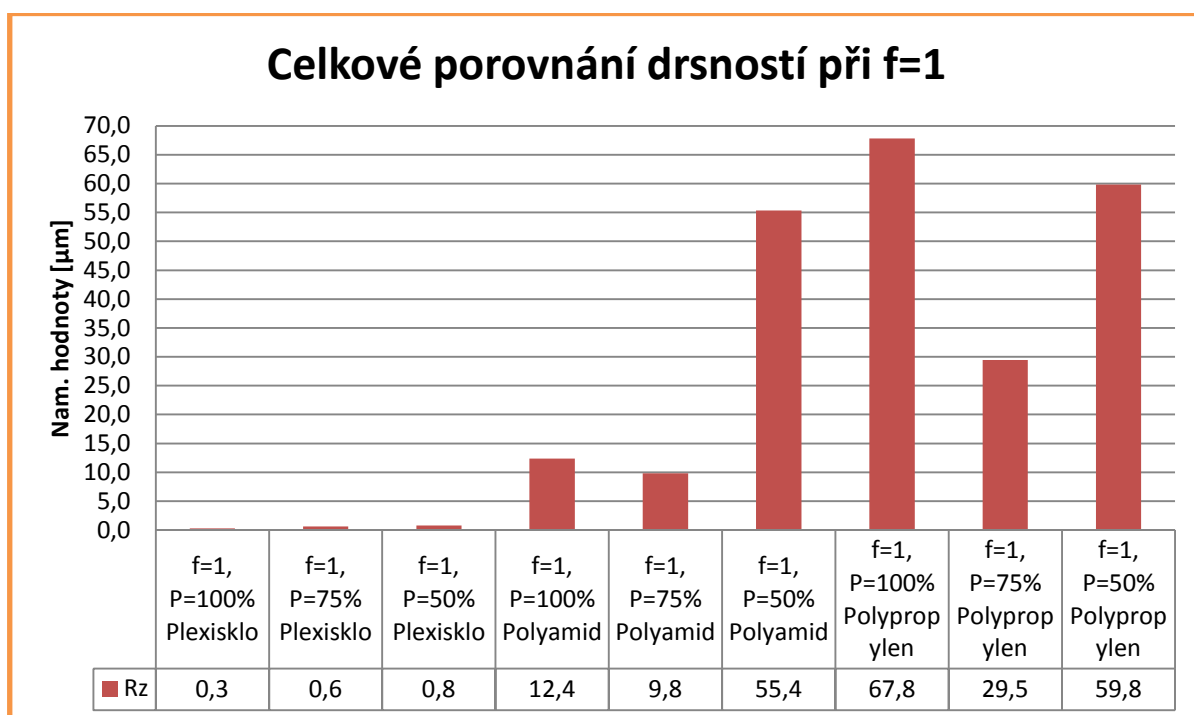


Graf 6. Porovnání drsnosti povrchu při $f=1$ a $P=50\%$

V grafu č. 6 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 1 neboli plexisklo. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem. Dále můžeme vidět, že materiály z polyamidu a polypropylenu jsou pro řezání za těchto podmínek nevyhovující. Nevyhovující z důvodu, že je poměrně vysoký parametr Ra a Rz. Také je to dáno tím, že tyto materiály mají špatné vlastnosti pro řezání laserem při těchto podmínkách.



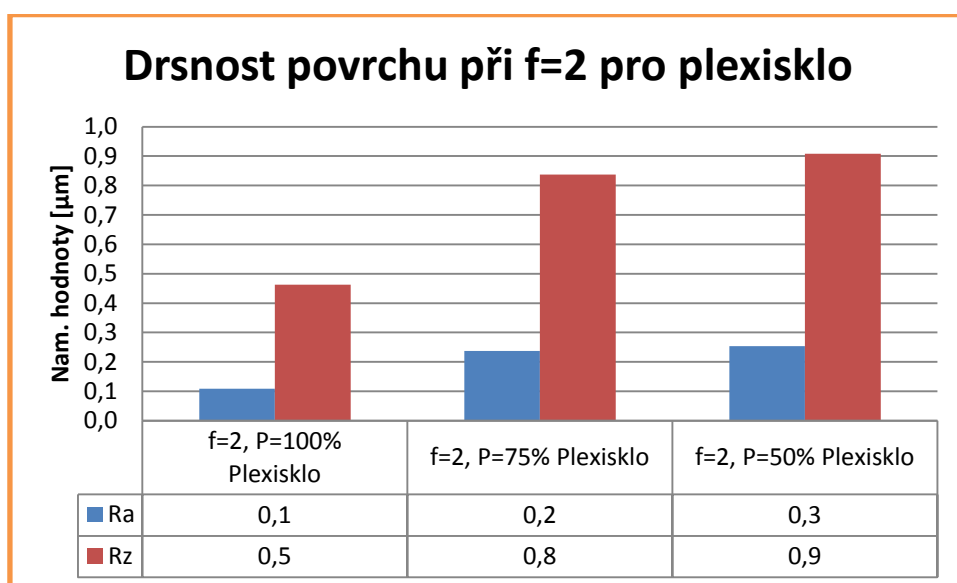
Graf 7. Celkové porovnání drsnosti povrchu Ra pro f=1



Graf 8. Celkové porovnání drsnosti povrchu Rz pro f=1

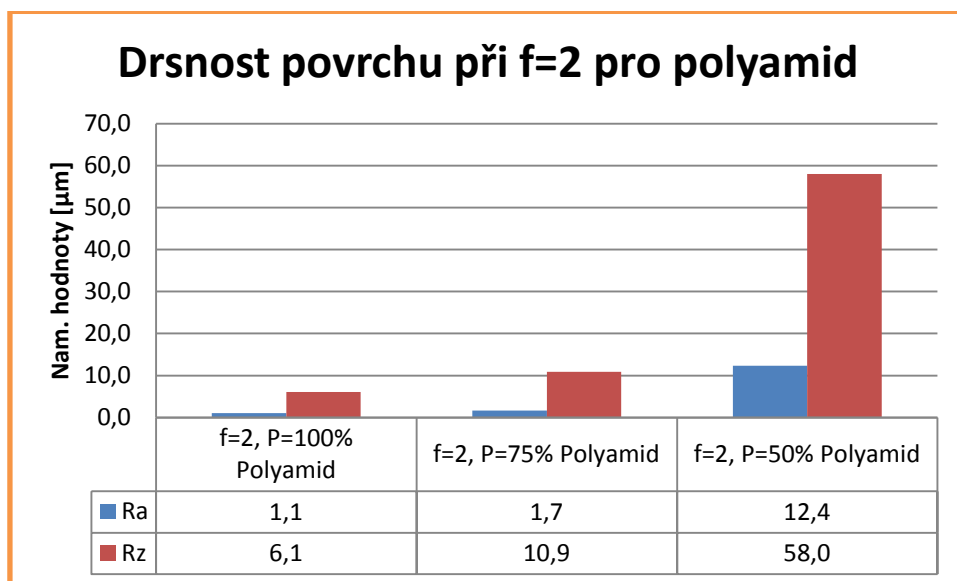
V grafech č. 7 a 8 vidíme celkové porovnání materiálů, které byly řezány rychlostí f=1 a u kterých byl použit výkon neboli energie od P=100 % do P=50 %. V grafech můžeme vidět, že nejlepší vlastnosti má plexisklo, dále má dobré vlastnosti při těchto podmínkách materiál z polyamidu a nejhůře dopadl materiál z polypropyleny, u kterého byly použity stejné podmínky řezu jako u předešlých materiálů.

5.2.2.3 Grafy vyhodnocených hodnot pro f=2



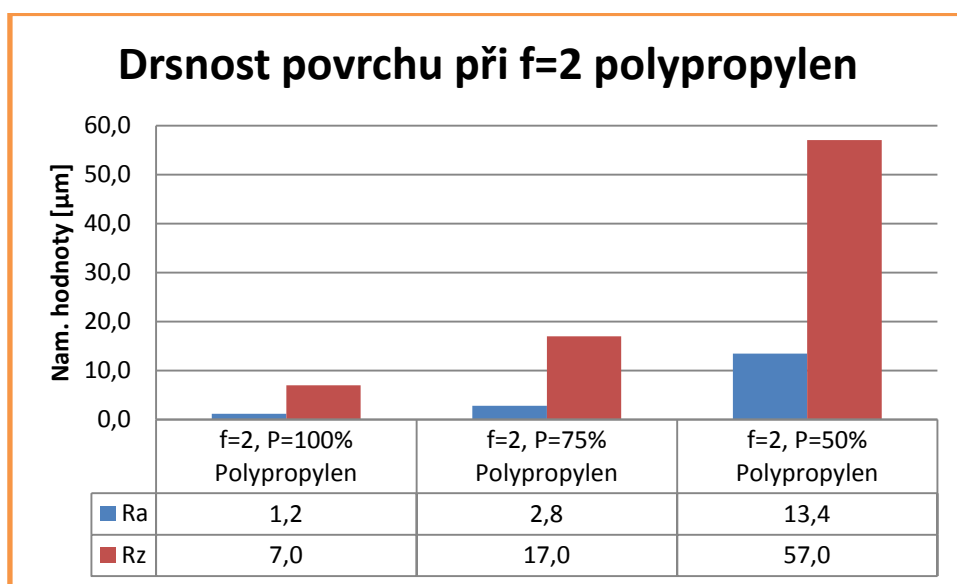
Graf 9. Graf drsnosti povrchu při f=2 pro plexisklo

V grafu č. 9 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 2 mm/s a výkon stroje od 100 % do 50 % pro materiál plexisklo se moc výrazně od sebe neliší drsnost neboli parametr Ra. Drsnost povrchu je hladká a je to dáno tím, že působí při řezání na povrchu teplo laseru po celé délce řezu. Parametr Rz nám ukazuje, jaká se objevuje na řezích nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 100% výkon. Je to dáno tím, že rychlost řezu je velmi malá tudíž na řeznou plochu působí delší dobu teplo paprsku po celé délce řezu.



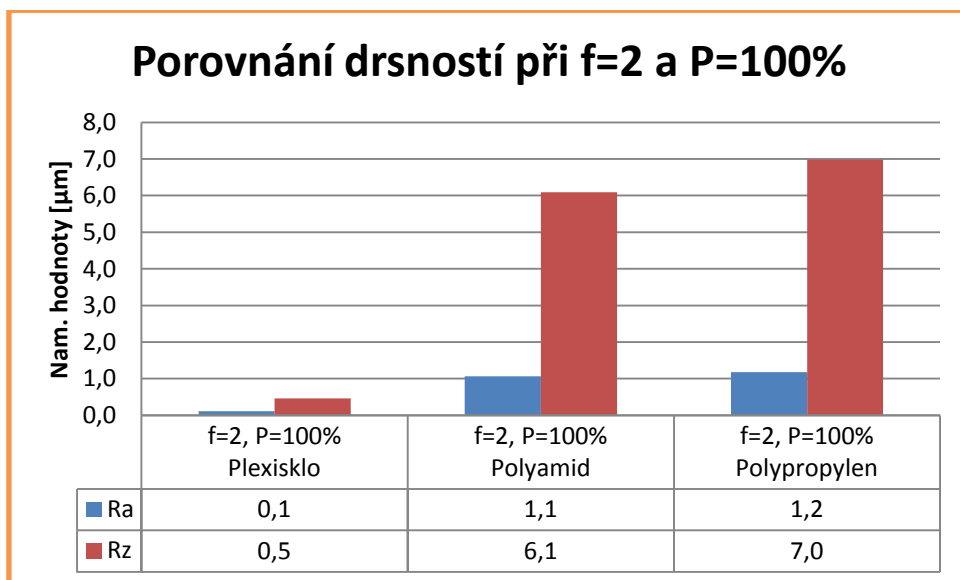
Graf 10. Graf drsnosti povrchu při f=2 pro polyamid

V grafu č. 10 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 2 mm/s a výkon stroje od 100 % do 50 % pro materiál polyamid se moc výrazně od sebe neliší drsnost neboli parametr Ra, až na zvolené parametry řezu ($f=2$, $P=50\%$), u kterého drsnost povyskočila až na hodnotu $12,4\text{ }\mu\text{m}$. Drsnost povrchu je hladká a je to dáno tím, že působí při řezání na povrchu teplo laseru po celé délce řezu. U zvoleného parametru ($f=2$, $P=50\%$) vyšla daná drsnost výš než u předešlých vzorků, jelikož řezaná část při řezu se začala k sobě spékat dohromady, protože byl výkon (energie) stroje nízký, a tudíž na přeřezání vzorku musel být použit další řez, který materiál oddělil od sebe. Parametr Rz nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 100% výkon stroje. Je to dáno tím, že rychlost řezu je velmi malá a výkon stroje je optimální pro řezání tohoto materiálu danými parametry.



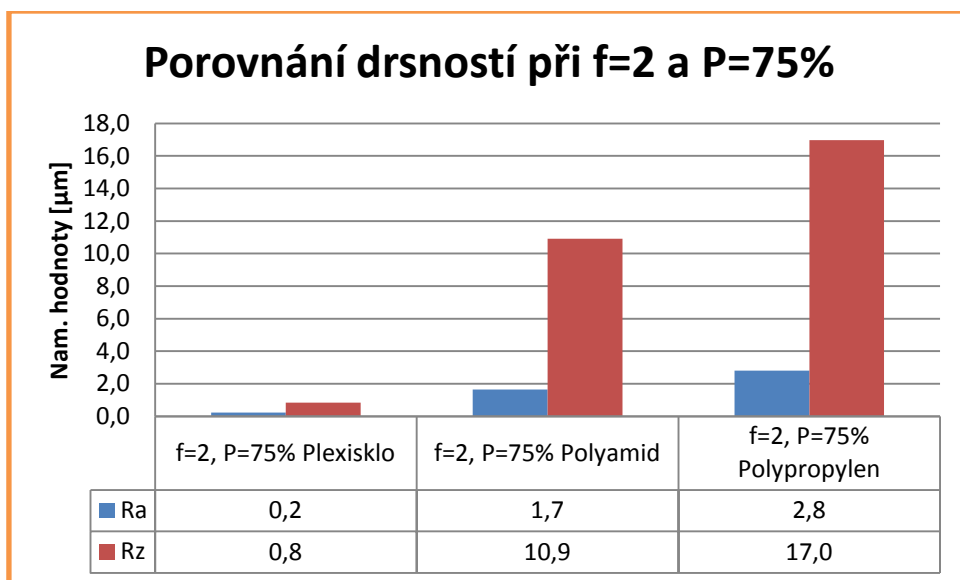
Graf 11. Graf drsnosti povrchu při $f=2$ pro polypropylen

V grafu č. 11 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 2 mm/s a výkon stroje od 100 % do 50 % pro materiál polypropylen se moc výrazně od sebe neliší drsnost neboli parametr Ra, až na zvolené parametry řezu ($f=2$, $P=50\%$), u kterého drsnost povyskočila až na hodnotu $13,4\text{ }\mu\text{m}$. Drsnost povrchu je vrásčitá a je to dáno tím, že působí při řezání na povrchu teplo laseru po celé délce řezu a daný materiál se při těchto zvolených podmínkách začal k sobě lepit. U zvoleného parametru ($f=2$, $P=50\%$) vyšla daná drsnost výš než u předešlých vzorků, jelikož řezaná část při řezu se začala k sobě lepit dohromady, protože byl výkon (energie) stroje nízký, a tudíž na přeřezání vzorku musel být použit další řez, který materiál oddělil od sebe. Parametr Rz nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 100% výkon stroje, ale pro výkon 75% není parametr tak moc vysoký jako u parametru a vzorku č. 3. Je to dáno tím, že rychlost řezu je velmi malá a výkon stroje je příliš nízký pro řezání tohoto materiálu danými parametry.



Graf 12. Porovnání drsnosti povrchu při $f=2$ a $P=100\%$

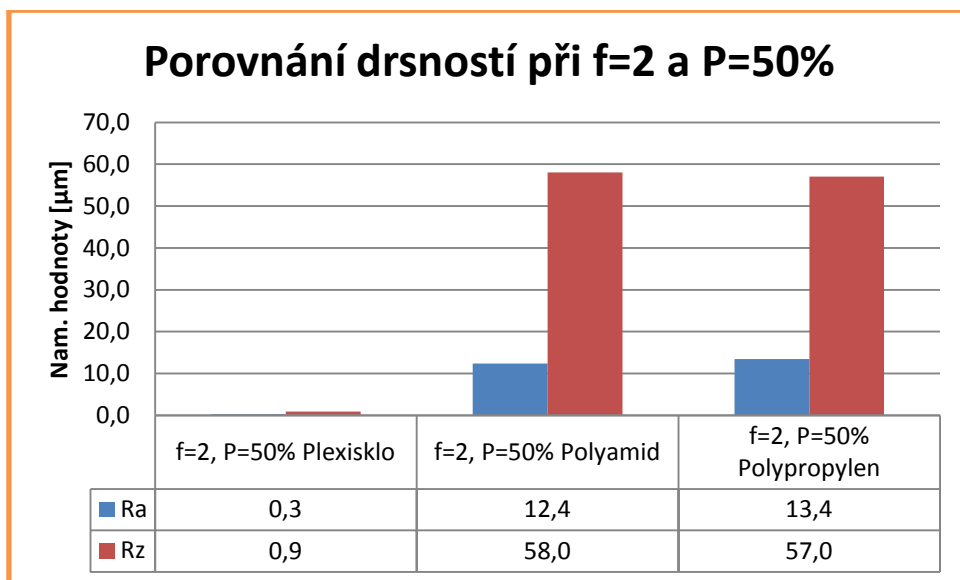
V grafu č. 12 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 1 neboli plexisklo. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem. Také ale moc nezaostávají materiály z polyamidu a polypropylenu, které se při těchto zvolených podmínkách chovají taktéž výborně, až na parametr Rz, který je sice podobný, ale přesto dosti vyšší oproti plexisklu. Je to dáno tím, že tyto materiály mají horší vlastnosti při řezání laserem než plexisklo.



Graf 13. Porovnání drsnosti povrchu při $f=2$ a $P=75\%$

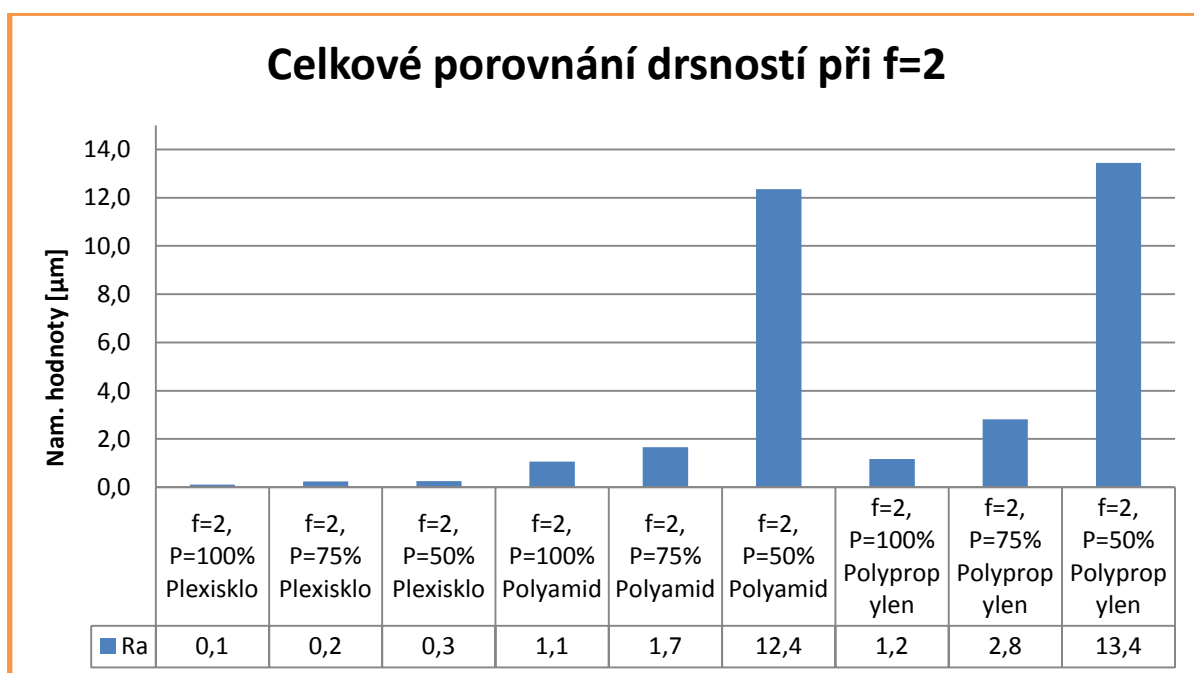
V grafu č. 13 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 1 neboli plexisklo. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem. Nelepil se k sobě a pěkně se odřezával. Také ale moc nezaostávají materiály z polyamidu a polypropylenu, u kterých můžeme vidět, že jejich vyhodnocené parametry

nejdou moc vysoké, ale jejich vyhodnocený parametr Rz je o dost vyšší oproti plexisklu. Tento vyhodnocený parametr je vyšší proto, jelikož při řezu docházelo k lehkému spojení odřezávaného vzorku, a tudíž tam vznikaly vyšší nerovnosti než u plexiskla, které se pěkně odřezávalo od sebe.

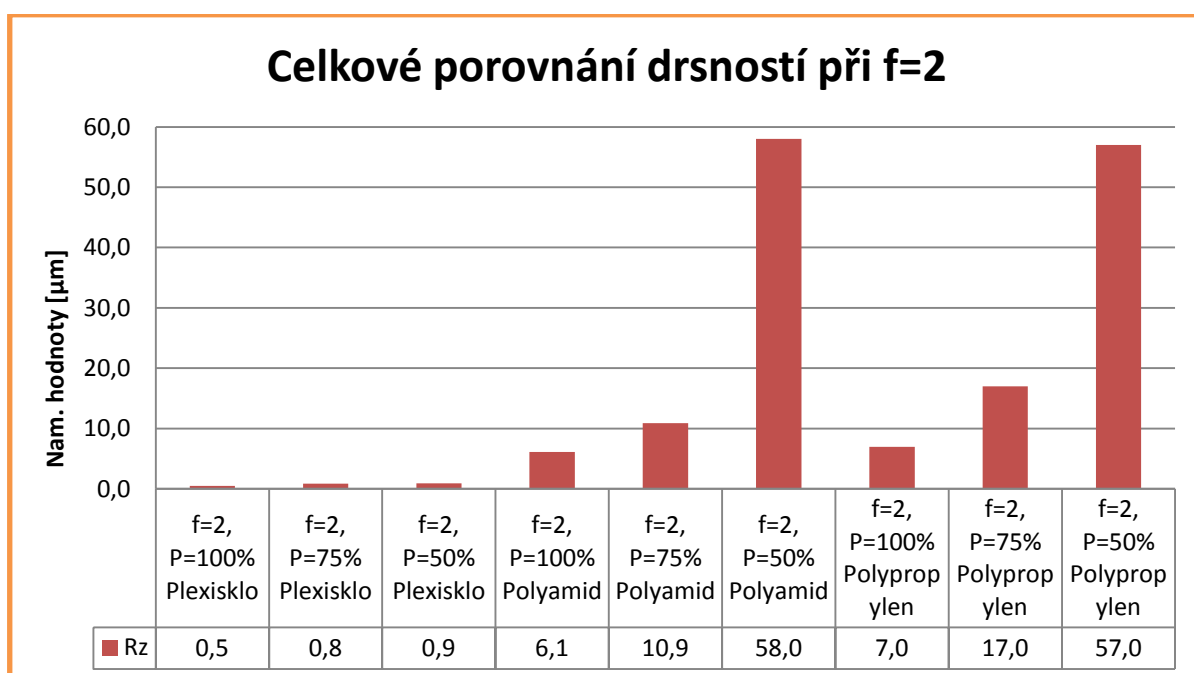


Graf 14. Porovnání drsnosti povrchu při f=2 a P=50 %

V grafu č. 14 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 1 neboli plexisklo. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem. Dále můžeme vidět, že materiály z polyamidu a polypropylenu jsou pro řezání za těchto podmínek nevhodující. Nevhodující z důvodu, že je poměrně vysoký parametr Ra a Rz. Také je to dáno tím, že tyto materiály mají špatné vlastnosti pro řezání laserem těmito podmínkami. Jejich vyhodnocené parametry jsou velice podobné, jelikož při řezání se muselo použít více řezů k odřezání vzorku, jelikož při těchto zvolených podmínkách se materiál lepil k sobě a nebylo možné jej od sebe oddělit při jednom řezu.



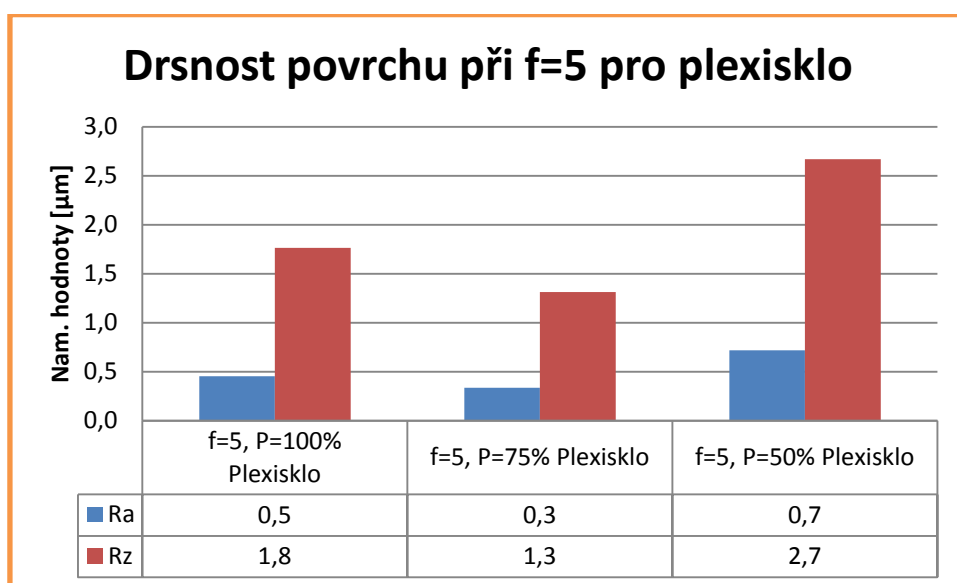
Graf 15. Celkové porovnání drsnosti povrchu Ra pro f=2



Graf 16. Celkové porovnání drsnosti povrchu Rz pro f=2

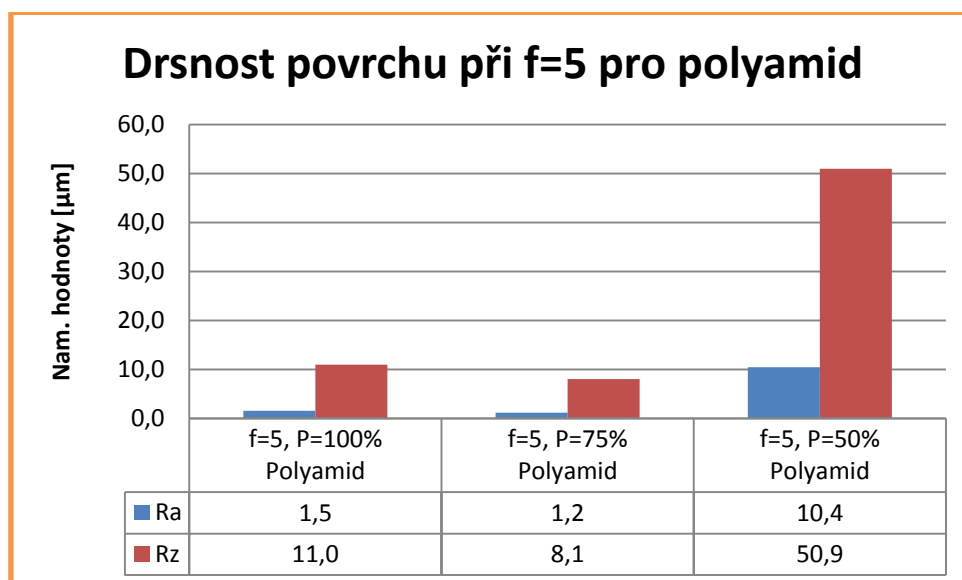
V grafech č. 15 a 16 vidíme celkové porovnání materiálů, které byly řezány rychlostí f=2 a u kterých byl použit výkon neboli energie od P=100 % do P=50 %. V grafech můžeme vidět, že nejlepší vlastnosti má plexisklo, dále má dobré vlastnosti při těchto podmínkách materiál z polyamidu a nejhůře dopadl materiál z polypropyleny, u kterého byly použity stejné podmínky řezu jako u předešlých materiálů. U materiálu z polypropyleny si můžeme povšimnout, že při tomto porovnání má hodně podobné vyhodnocené parametry jako materiál z polyamidu.

5.2.2.4 Grafy vyhodnocených hodnot pro f=5



Graf 17. Graf drsnosti povrchu při f=5 pro plexisklo

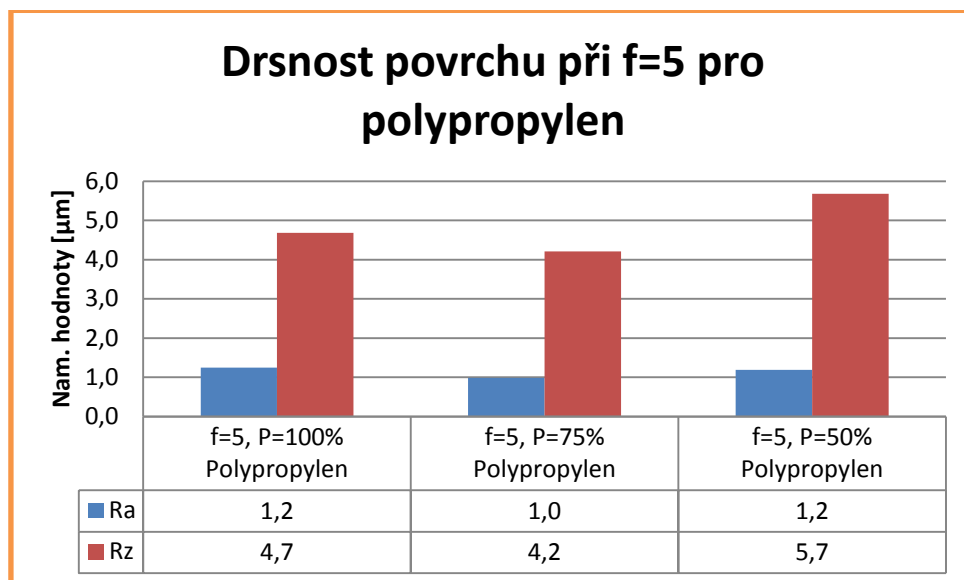
V grafu č. 17 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 5 mm/s a výkon stroje od 100 % do 50 % pro materiál plexisklo se moc výrazně od sebe neliší drsnost neboli parametr Ra. Drsnost povrchu je stále hladká a je to dáno tím, že působí při řezání na povrchu teplo laseru po celé délce řezu. Parametr Rz nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 75% výkon, který je pro tento zvolený parametr řezání optimální.



Graf 18. Graf drsnosti povrchu při f=5 pro polyamid

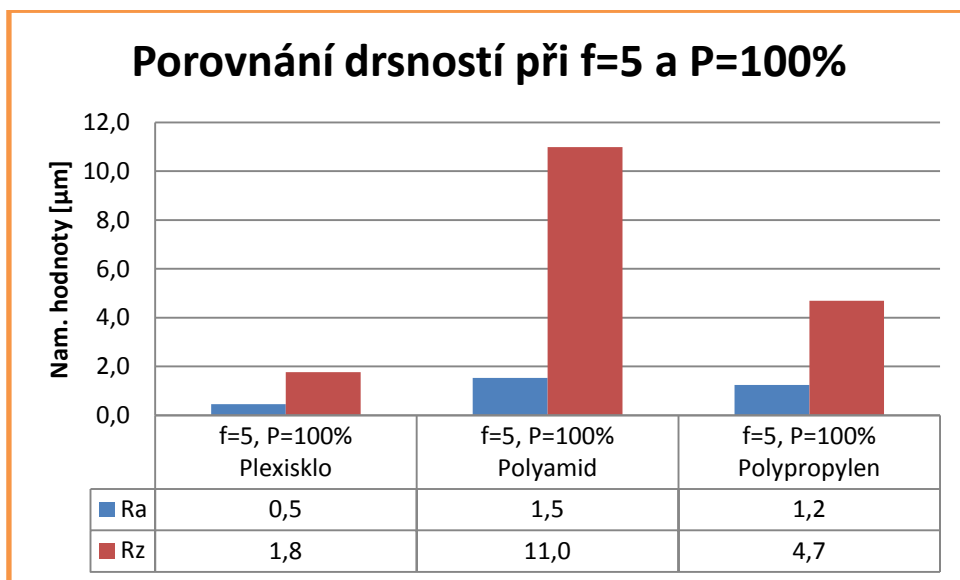
V grafu č. 18 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 5 mm/s a výkon stroje od 100 % do 50 % pro materiál polyamid se od sebe liší drsnost neboli parametr Ra, až na zvolené

parametry řezu ($f=5$, $P=50\%$), u kterého je drsnost $10,4\text{ }\mu\text{m}$. Drsnost povrchu je strupovitá a je to dáno tím, že rychlost řezu je dosti vysoká a materiál se při řezání začne spékat dohromady. Parametr R_z nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 75% výkon stroje. U dalších vzorků se parametr R_z ještě zvýšil, jelikož při řezu docházelo k opětovnému spojení a bylo nutné vzorek znovu přerezat.



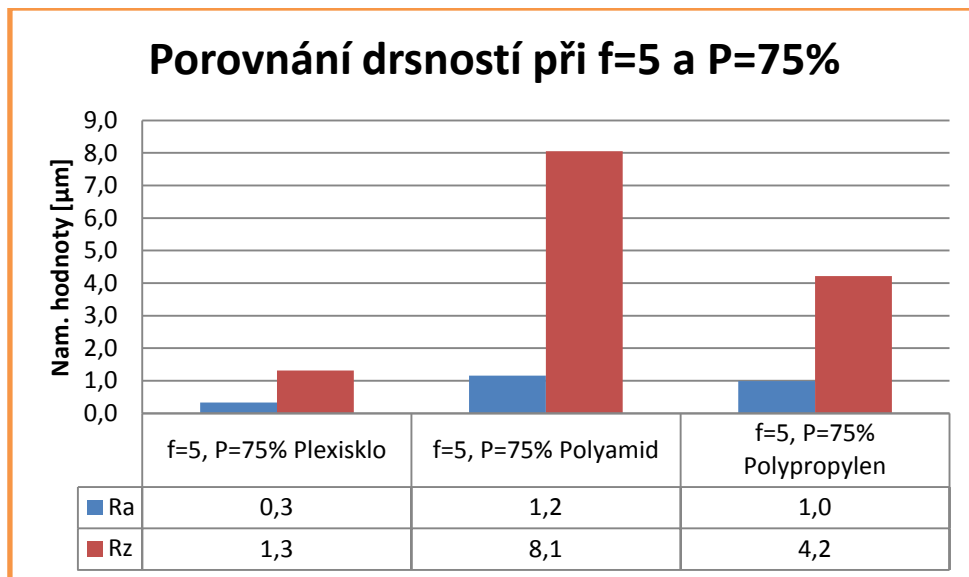
Graf 19. Graf drsnosti povrchu při $f=5$ pro polypropylen

V grafu č. 19 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 5 mm/s a výkon stroje od 100% do 50% pro materiál polypropylen se moc výrazně od sebe neliší drsnost neboli parametr R_a . Drsnost povrchu je hladká a je to dáno tím, že působí při řezání na povrchu teplo laseru po celé délce řezu a daný materiál se při těchto zvolených podmínkách odtavoval, čímž způsobil takovouto drsnost. Parametr R_z nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 75% výkon stroje, je to dáno tím, že tenhle výkon stroje je pro řezání polypropylenu optimální.



Graf 20. Porovnání drsnosti povrchu při $f=5$ a $P=100\%$

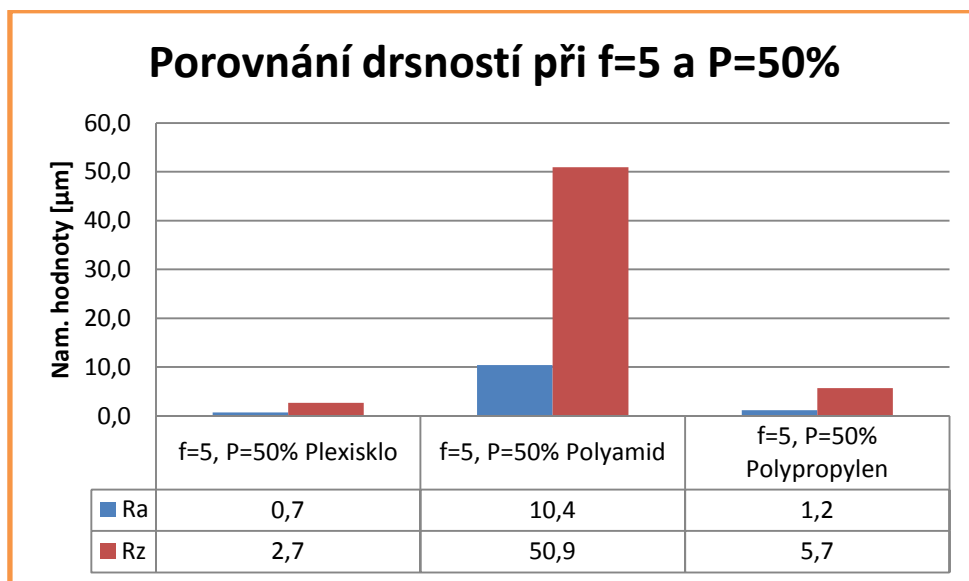
V grafu č. 20 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 1 neboli plexisklo. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem. Také ale moc nezaostávají materiály z polyamidu a polypropyleny, které se při těchto zvolených podmínkách chovají taktéž výborně, až na parametr Rz, který je dosti vyšší oproti plexisklu. Je to dáno tím, že tyto materiály mají horší vlastnosti při řezání laserem než plexisklo.



Graf 21. Porovnání drsnosti povrchu při $f=5$ a $P=75\%$

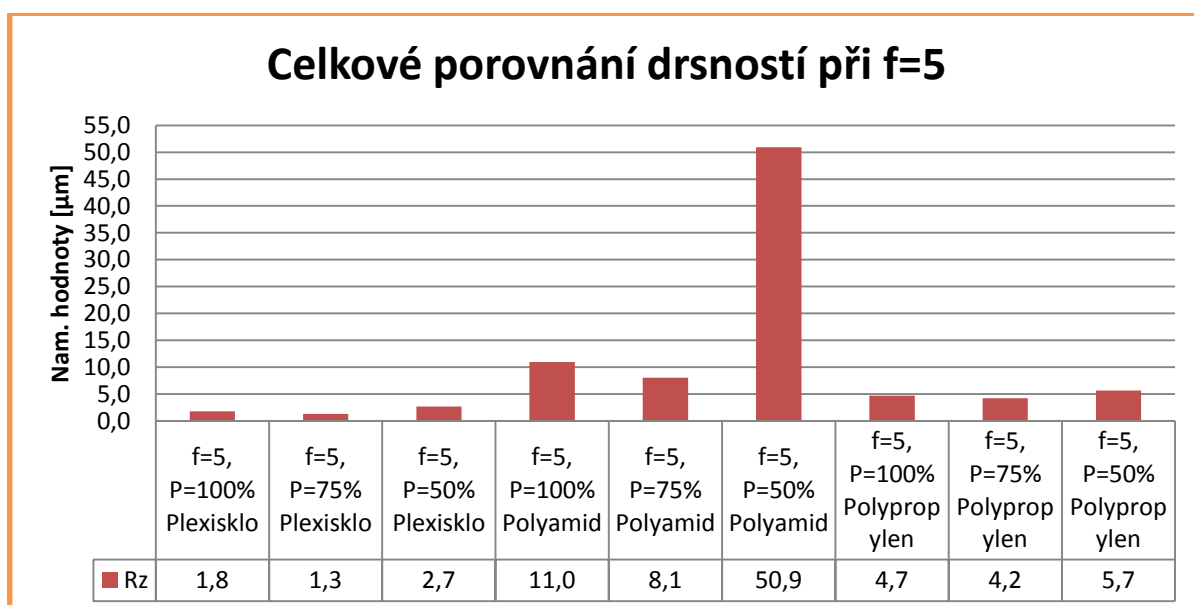
V grafu č. 21 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 1 neboli plexisklo. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem. Nelepil se k sobě a pěkně se odřezával. Také ale moc nezaostává materiál

z polypropylenu, který má oproti plexisklu o dost vyšší parametr Rz. Nejhůře dopadl polyamid, který při těchto zvolených podmínkách měl nejhorší vlastnosti pro řez.

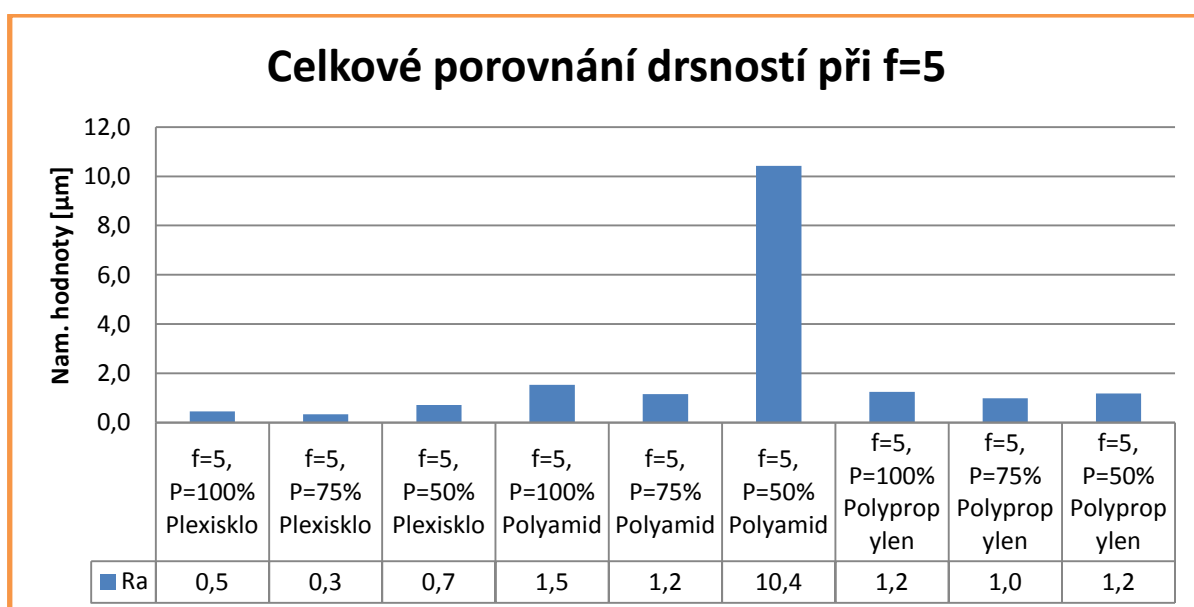


Graf 22. Porovnání drsnosti povrchu při f=5 a P=50 %

V grafu č. 22 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 1 neboli plexisklo. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem. Dále můžeme vidět, že materiál z polyamidu řezaný těmito podmínkami je pro řezání nevhovující. Nevhovující z důvodu, že je poměrně vysoký parametr Ra a Rz. Také je to dáno tím, že tento materiál má špatné vlastnosti pro řezání laserem těmito podmínkami. Také stojí za povšimnutí, že polypropylen má o dost nižší hodnotu Ra i Rz oproti polyamidu, ale zase horší oproti plexisklu. Tento materiál je vyhovující pro řezání těmito podmínkami.



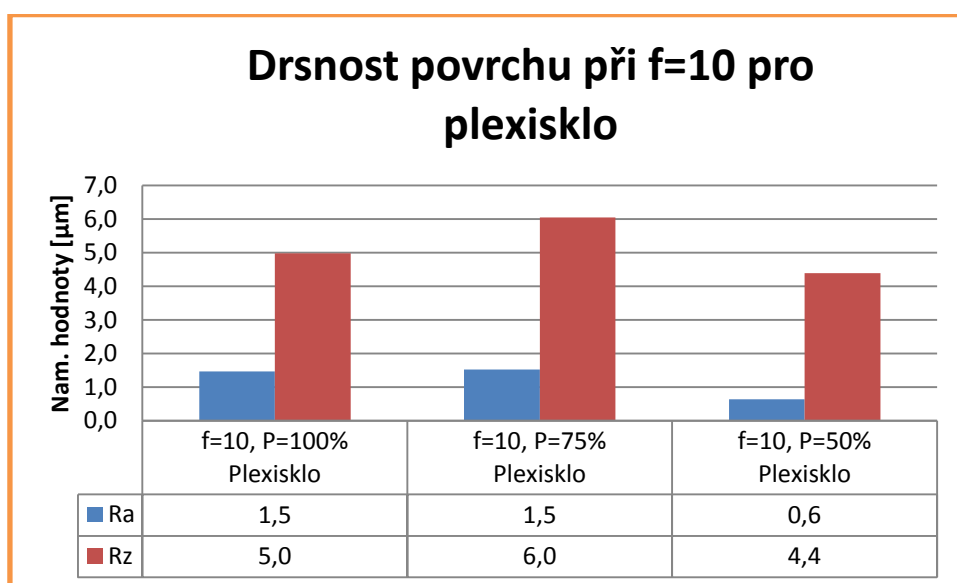
Graf 23. Celkové porovnání drsnosti povrchu Rz pro f=5



Graf 24. Celkové porovnání drsnosti povrchu Ra pro f=5

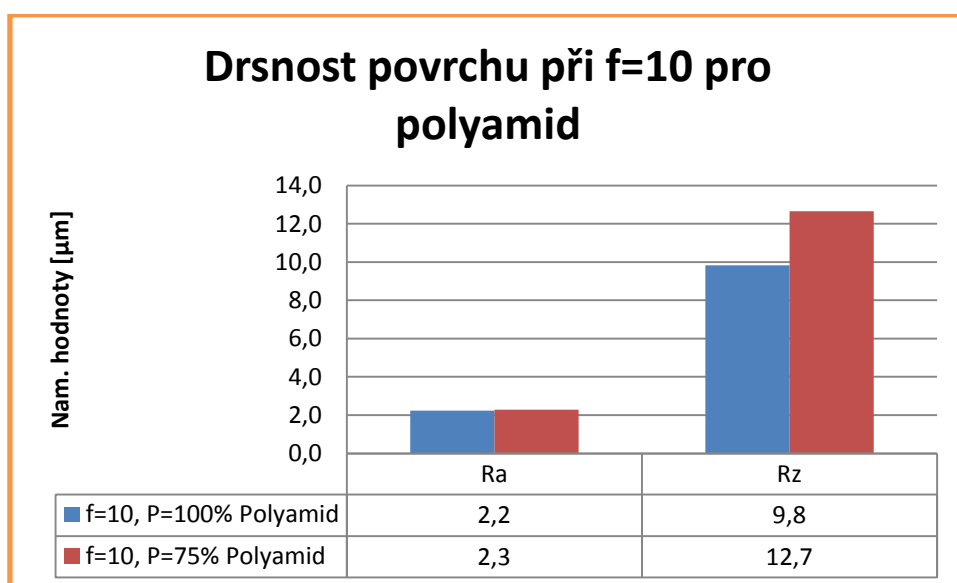
V grafech č. 23 a 24 vidíme celkové porovnání materiálů, které byly řezány rychlostí f=5 a u kterých byl použit výkon neboli energie od P=100 % do P=50 %. V grafech můžeme vidět, že nejlepší vlastnosti má plexisklo, dále má dobré vlastnosti při těchto podmínkách materiál z polyamidu a polypropyleny, u kterého si můžeme povšimnout, že nejhorší vzorek je u něj č. 3 pro 50% výkon. Je to dáno výkonem stroje, jelikož tenhle výkon nebyl schopen materiál přerežat najednou a musel se řezat na vícekrát.

5.2.2.5 Grafy vyhodnocených hodnot pro $f=10$



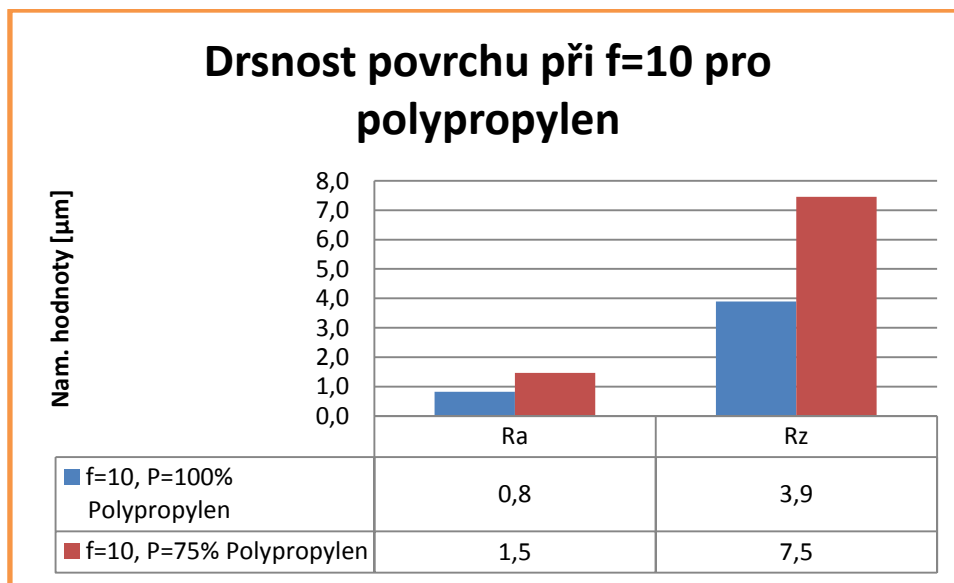
Graf 25. Graf drsnosti povrchu při $f=10$ pro plexisklo

V grafu č. 25 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 10 mm/s a výkon stroje od 100 % do 50 % pro materiál plexisklo se moc výrazně od sebe neliší drsnost neboli parametr Ra. Drsnost povrchu je stále hladká a je to dáno tím, že působí při řezání na povrchu teplo laseru po celé délce řezu. U měřeného výkonu 50 % můžeme vidět, že drsnost je o polovinu menší oproti předešlým vzorkům. Je to dáno tím, že vzorek nebylo možné přerežat na jeden řez a bylo potřeba použít více řezů na přerežání tohoto vzorku a díky tomu je drsnost nižší. Parametr Rz nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 50% výkon.



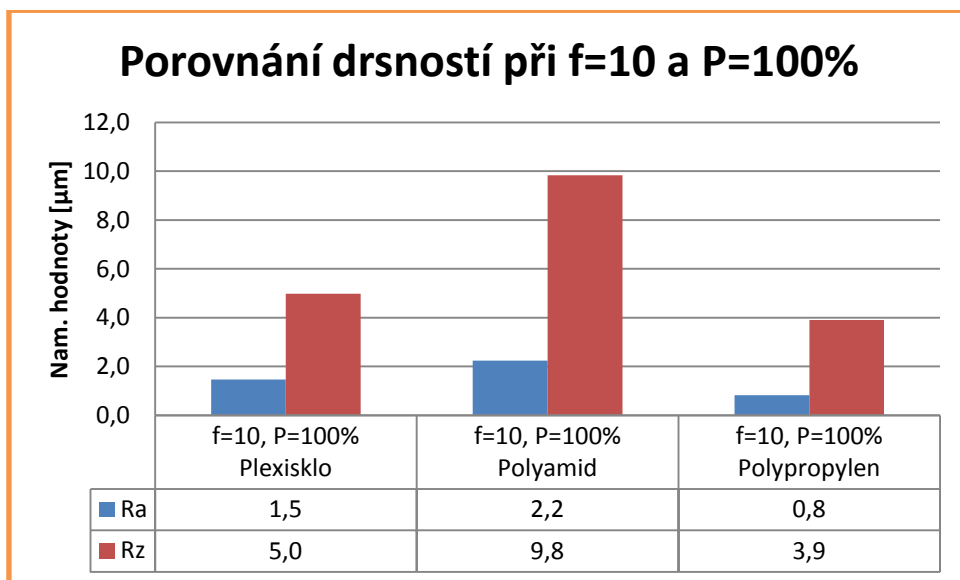
Graf 26. Graf drsnosti povrchu při $f=10$ pro polyamid

V grafu č. 26 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 10 mm/s a výkon stroje od 100 % do 75 % pro materiál polyamid se od sebe liší drsnost neboli parametr Ra. Tento materiál má špatné vlastnosti pro řezání laserem těmito rychlostmi, a tudíž se k přerezáni vzorku muselo použít více řezů, aby bylo možné vzorky přerezat. Drsnost povrchu je strupovitá a je to dáno tím, že rychlost řezu je dosti vysoká a materiál se při řezání začne spékat dohromady. Parametr Rz nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 100% výkon stroje. U dalšího vzorku se parametr Rz ještě zvýšil, jelikož při řezu docházelo k opětovnému spojení a bylo nutné vzorek znovu přerezat.



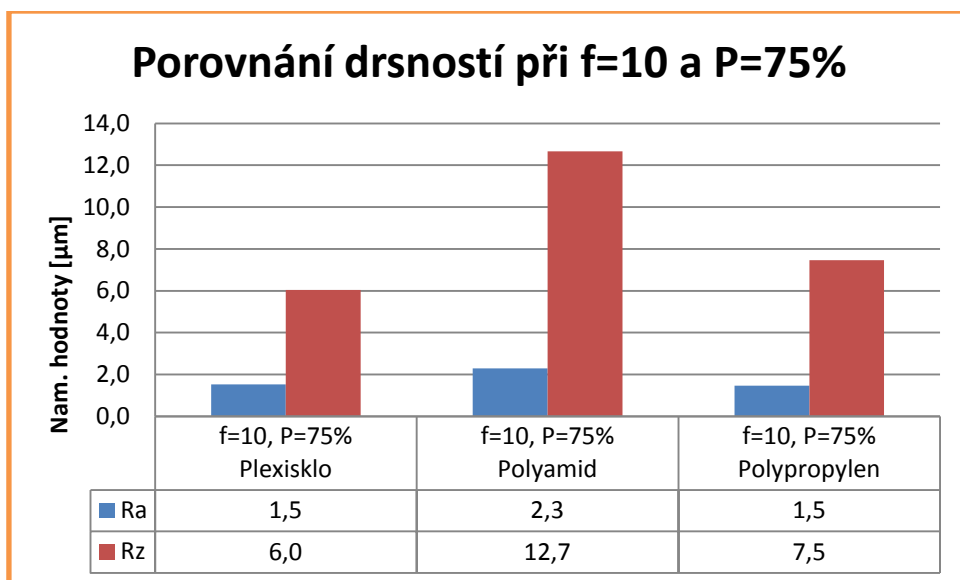
Graf 27. Graf drsnosti povrchu při f=10 pro polypropylen

V grafu č. 27 můžeme vidět, že pro rychlost řezu 10 mm/s a výkon stroje od 100 % do 75 % pro materiál polypropylen se od sebe liší drsnost neboli parametr Ra. Tento materiál má špatné vlastnosti pro řezání laserem těmito rychlostmi, a tudíž se k přerezáni vzorku muselo použít více řezů, aby bylo možné vzorky přerezat. Drsnost povrchu je vrásčitá a je to dáno tím, že působí při řezání na povrchu teplo laseru po celé délce řezu a daný materiál se při těchto zvolených podmínkách začal k sobě lepit. Parametr Rz nám ukazuje, jaká se objevuje na řezech nerovnost. Můžeme vidět, že nerovnost je nejlepší pro 100% výkon stroje, ale tato porovnání jsou zkreslená, jelikož bylo nutné použít více než jednoho řezu.



Graf 28. Porovnání drsnosti povrchu při f=10 a P=100 %

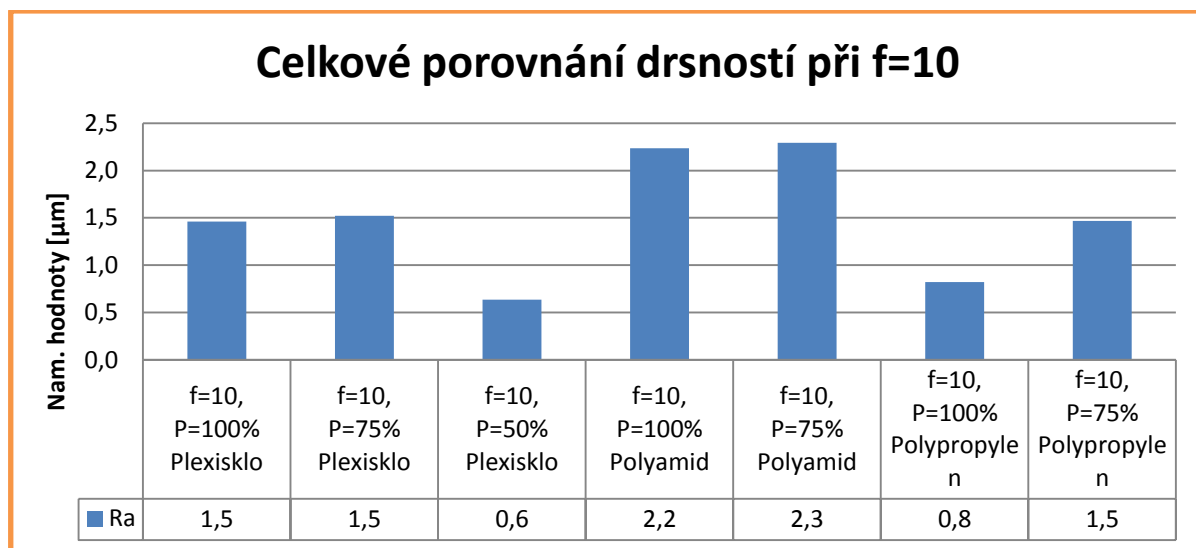
V grafu č. 28 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 3 neboli polypropylen. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem, také díky vyšší rychlosti, že materiál má lepší tepelné vlastnosti při těchto podmínkách. Také ale moc nezaostávají materiály z polyamidu a plexiskla, které se při těchto zvolených podmínkách chovají taktéž výborně, až na parametr Rz, který je dosti vyšší oproti polypropylenu.



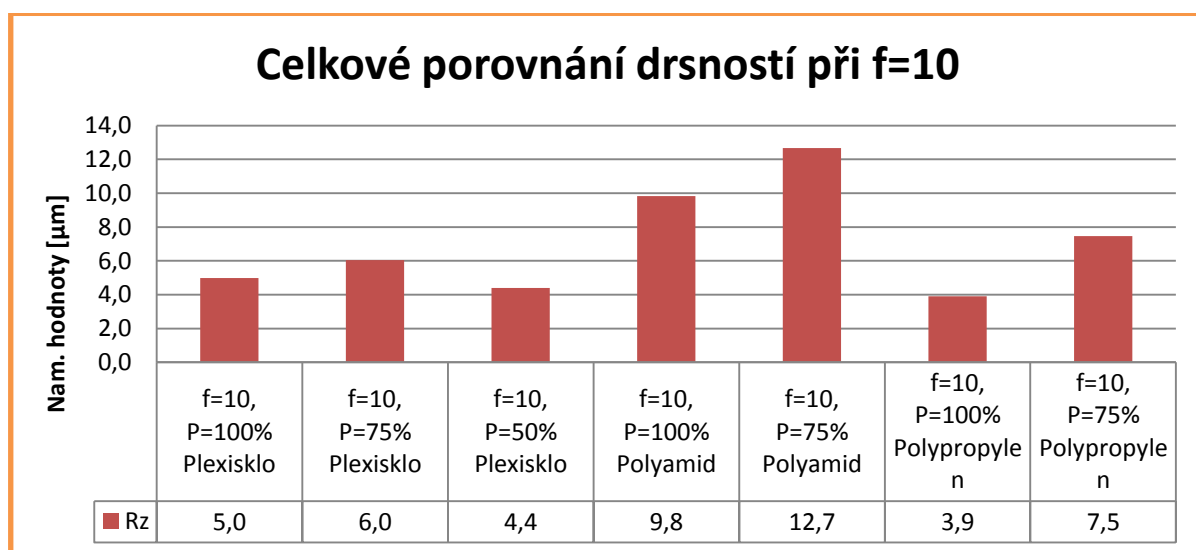
Graf 29. Porovnání drsnosti povrchu při f=10 a P=75 %

V grafu č. 29 při porovnání vzorků stejných parametrů vidíme, že nejlépe vychází vzorek č. 1 a 3 neboli plexisklo a polypropylen. Je to dáno tím, že materiál má nejlépe vyhovující vlastnosti pro řezání laserem, také díky vyšší rychlosti, že materiál má lepší tepelné vlastnosti při těchto podmínkách. Nelepil se k sobě a pěkně se po částech odřezával.

Také ale moc nezaostává materiál z polyamidu, který má oproti plexisklu a polypropylenu o dost vyšší parametr Rz. Nejhuře dopadl polyamid, který při těchto zvolených podmínkách měl nejhorší vlastnosti pro řez.



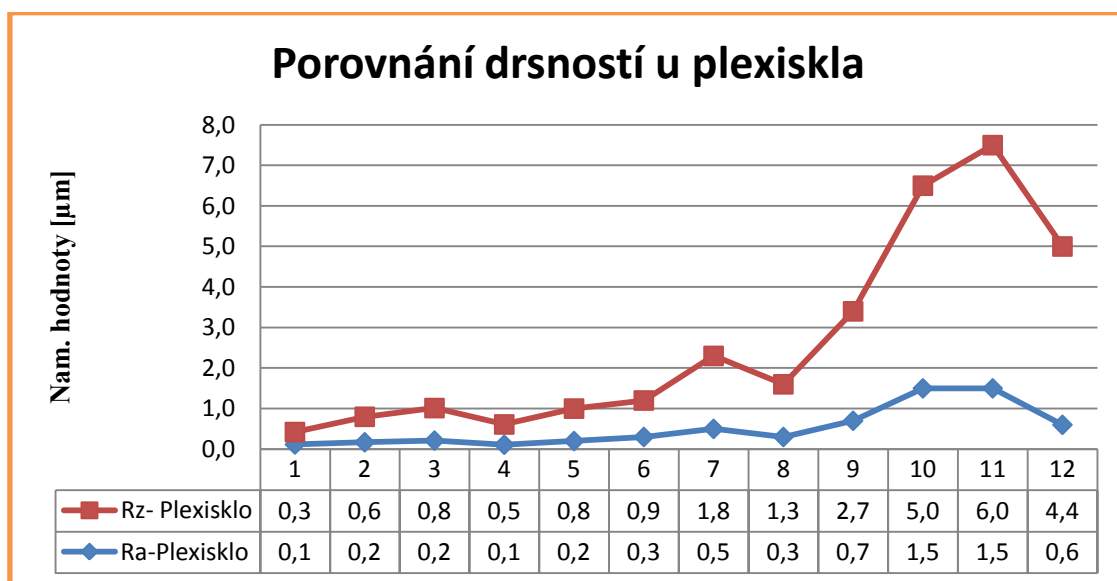
Graf 30. Celkové porovnání drsnosti povrchu Ra pro f=10



Graf 31. Celkové porovnání drsnosti povrchu Rz pro f=10

V grafech č. 30 a 31 vidíme celkové porovnání materiálů, které byly řezány rychlostí f=10 a u kterých byl použit výkon neboli energie od P=100 % do P=50 %. V grafech můžeme vidět, že nejlepší vlastnosti má plexisklo, dále má dobré vlastnosti při těchto podmínkách materiál z polyamidu a polypropylenu, u kterých si můžeme povšimnout, že jsou řezány jen do výkonu stroje 75 %. Je to tím že, když se zmenšil výkon na 50 %, tak se vzorky vůbec neodřezávaly a u těchto řezů by to trvalo hodně dlouho, než by se vzorek odřezal, tudíž jsou u polyamidu a polypropylenu jen vyhodnocené parametry do výkonu stroje 75 %.

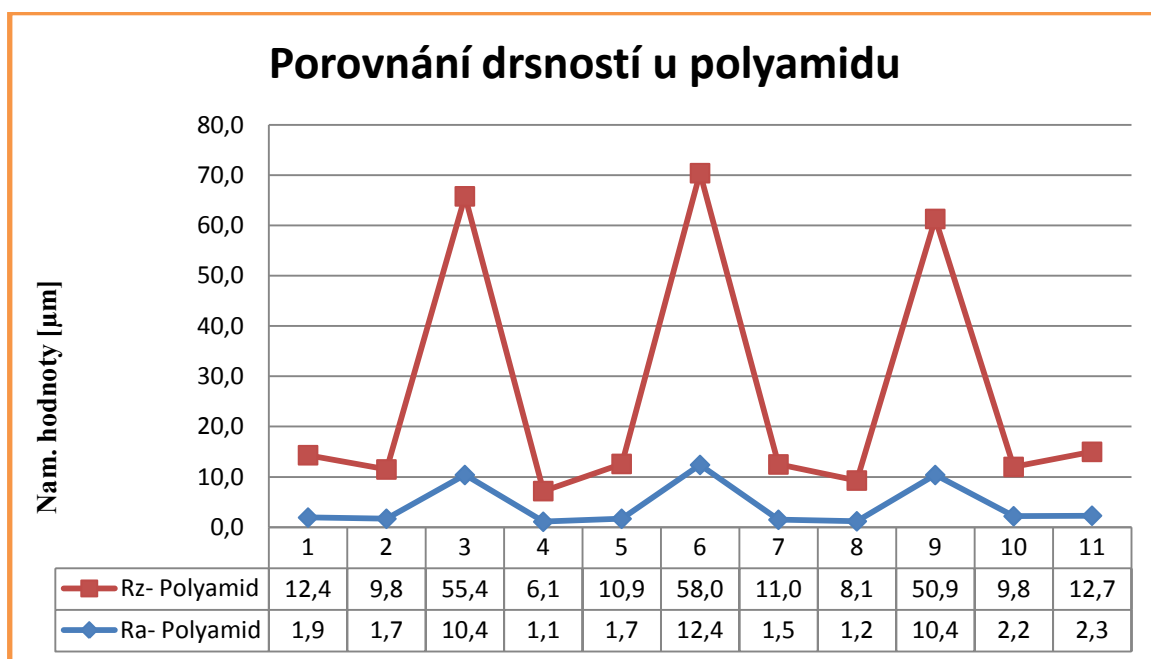
5.3 Celkové hodnoty pro plexisklo



Graf 32. Celkové porovnání drsnosti povrchu pro plexisklo

V grafu č. 32 můžeme vidět, že když použijeme vyšší rychlost řezání u plexiskla, tak to má za následek to, že jeho parametry Ra a Rz se zvyšují. Nejlepší výsledky mají vzorky, které se řezaly rychlostí řezu 1 a 2 mm/s. Taktéž musíme říct, že špatných výsledků nedosahují rychlosti řezu 5 a 10 mm/s. Tento zkoušený materiál projevil výborné výsledky pro řezání laserem.

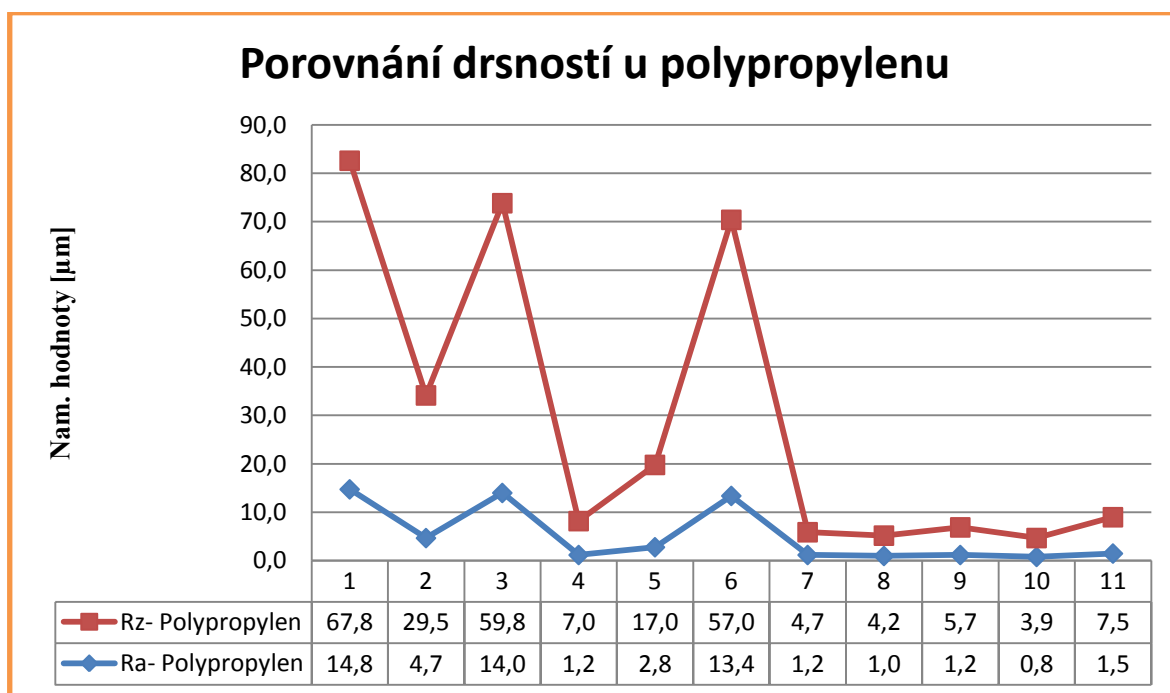
5.4 Celkové hodnoty pro polyamid



Graf 33. Celkové porovnání drsnosti povrchu pro polyamid

V grafu č. 33 můžeme vidět, že když začneme snižovat výkon stroje pro řezání polyamidu, má to za následek, že se začne zhoršovat drsnost povrchu a zhoršuje se i nerovnost na povrchu neboli parametr Rz. Nejlepší výsledky mají vzorky, které se řezaly rychlostí řezu 1 a 2 mm/s a byl použit výkon 100 % a 75 %. Při snížení výkonu na 50 % to vedlo k tomu, že stroj nebyl schopen materiál přerezat najednou a bylo nutno použít více řezů k uřezání vzorku. Díky tomu je o dost vyšší drsnost. Taktéž musíme říct, že špatných výsledků nedosahuje rychlost řezu 10 mm/s. U tohoto řezu bylo použito více než jedno řezání k uřezání vzorku, a tudíž je výsledek zkreslený.

5.5 Celkové hodnoty pro polypropylen



Graf 34. Celkové porovnání drsnosti povrchu pro polyamid

V grafu č. 34 můžeme vidět, že nejlepší výsledky mají vzorky, které se řezaly rychlostí řezu 2, 5 a 10 mm/s a byl použit výkon 100 % a 75 %. Při snížení výkonu na 50 % to vedlo k tomu, že stroj nebyl schopen materiál přerezat najednou a bylo nutno použít více řezů k uřezání vzorku. U řezu 10 mm/s bylo použito více než jedno řezání k uřezání vzorku, a tudíž je výsledek zkreslený. Nejhorší dopadly vzorky, které se řezaly rychlostí řezu 1 mm/s. Výsledná drsnost je tak vysoká, jelikož se materiál při řezu k sobě lepil.

6 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá hodnocením a zjišťováním parametrů laseru na kvalitu řezu při řezání plastů.

Dále se zabývá možnostmi výroby plastů, a to metodami vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním, rotačním natavováním a také jsou zmíněné speciální metody. Věnuji se široké experimentální činnosti, ve které se zabývám získáváním dat, která umožňují analýzu, a po zjištění výsledků se zabývám stanovením nejvhodnějších parametrů pro daný plast.

V diplomové práci se zabývám zkoumáním různých parametrů laseru, a to zejména jeho řezné rychlosti a výkonu stroje. Z těchto parametrů pak zjišťuji, jak se při jiných podmínkách změnila topografie povrchu a jeho drsnost. Naměřené hodnoty pak porovnávám s dalšími materiály a zjišťuji, jaké rozdílné parametry laseru musí být použity, aby byl povrch plastů co nejideálnější.

Lze také konstatovat, že s přibývající hloubkou řezu dochází k nárůstu hodnot parametrů drsnosti. Kvalita řezné hrany záleží také na způsobu řezání a nastavených řezných parametrech. Zvolené tavné řezání dosahuje kvalitní řezné plochy a součásti, jež jsou řezány touto metodou, ve většině případů nepotřebují další finální obrobení řezných hran.

U materiálu č. 1 neboli plexiskla bylo zjištěno, že jeho drsnost se pohybuje od 0,1 do 1,5 μm . Tento materiál projevoval výborné vlastnosti při řezání laserem, pouze u použité řezné rychlosti $f=10 \text{ mm/s}$ se muselo použít k uřezání vzorku více drah, jelikož jsme nebyli schopni vzorek přerezat na jednou. Bylo to zapříčiněno vysokou rychlostí řezu a použitým výkonem, tudíž výsledná drsnost je v tomto ohledu zkreslená.

U materiálu č. 2 neboli polyamidu bylo zjištěno, že jeho drsnost se pohybuje od 1,1 do 12,4 μm . Tento materiál projevoval dobré vlastnosti při řezání laserem, pouze když se snižoval výkon stroje, mělo to za následek, že jeho drsnost narůstala. Nejhorší výsledky byly, když jsme zvolili výkon stroje 50 % a rychlost řezání 1, 2 a 5 mm/s . U těchto parametrů nám vyšla nejhorší drsnost. Dále když jsme použili řeznou rychlost $f=10 \text{ mm/s}$, tak se muselo použít opakování dráhy, jelikož jsme nebyli schopni prořezat tento materiál najednou; taktéž tomu bylo u plexiskla. Tento materiál se nelepil k sobě, jelikož jeho dobré vlastnosti a zvolené parametry nezapříčinily jeho následné spojení po odřezání.

U materiálu č. 3 neboli polypropylenu bylo zjištěno, že jeho drsnost se pohybuje od 0,8 do 14,8 μm . Tento materiál projevoval nejhorší vlastnosti řezání laserem v porovnání se dvěma předchozími materiály. Tento materiál se při řezání lepil k sobě, a tudíž bylo potřeba použít více drah k přerezáni materiálu. Při použití řezné rychlosti $f=1 \text{ mm/s}$ a výkonu $P=100 \%$ se materiál odřezal najednou, ale byly vidět patrné stopy po paprsku, a tudíž vyšlo,

že drsnost je 14,8 μm . Ale při zvýšení řezné rychlosti se drsnost povrchu zmenšila. Bylo to způsobeno tím, že při zvýšení řezné rychlosti nebylo možné tento materiál odřezat najednou, a tudíž bylo zapotřebí řez opakovat. Tímto jsme dosáhli menší drsnosti povrchu, ale při řezání bylo vidět, že materiál se k sobě spéká, jelikož materiál měl horší teplotu tání než oba předchozí materiály.

Výsledkem tohoto experimentu je zjištění, že pro každý druh materiálu je potřeba nastavit na laseru rozdílné podmínky pro řezání určitého druhu materiálu neboli pastu. Obecně by se dalo použít k našemu experimentu, aby byl výsledek co nejlepší a aby se dalo použít na všechny zkoušené plasty, rychlost řezání $f=2 \text{ mm/s}$ a $P=75 \%$. Rychlost řezání $f=2 \text{ mm/s}$ je optimální pro všechny zkoušené plasty a vykazuje optimální drsnost pro náročného zákazníka. Avšak je nutné podotknout, že tato rychlost bude mít nedílnou spoluúčasť na ceně výrobku. Výkon stroje 75 % je taktéž optimální pro všechny zkoušené plasty a spolu s touto zvolenou řeznou rychlostí dosahují výborných výsledků. Navíc tento výkon poměrně zvyšuje životnost stroje, jelikož ho tolik nezatěžujeme.

Závěrem zbývá uvést, že požadavky zákazníka a užití řezané součásti mohou také citelně ovlivnit kvalitu řezné plochy. Pokud řezné hrany na součásti nejsou funkční plochy a nebude vadit horší vzhled zvýšené drsnosti, tak lze parametry řezného centra nastavit tak, aby byla co nejnižší cena zakázky na úkor kvality řezné plochy.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] DRÁBEK, Michal. *MĚŘENÍ DRSNOSTI ŘEZNÝCH HRAN PŘI LASEROVÉM DĚLENÍ KOVŮ*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [2] KUBIS, David. *Výzkum podmínek kopírování nedokonalostí povrchu na polymerní výrobky*. Zlín, 2006. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [3] Plast. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Plast>
- [4] Lisování a přetlačování plastů. *Lisování a přetlačování plastů* [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/09.htm
- [5] Technologie vstřikování a vytlačování. *Technologie vstřikování a vytlačování* [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: http://www.techno-mat.cz/data/katedry/ksp/KSP_MTK_PR_01_CZE_Ausperger_Technologie_vstrikovani_a_vytlacovani.pdf
- [6] HLAVIČKA, Aleš; VEJRAŽKOVÁ, Ivana. *Plasty pro stavebnictví a architekturu I – Úvod do zpracování plastů* [online]. 18.1.2008. iMateriály [cit. 2015-04-16] Dostupné z : < <http://www.imaterialy.cz/clanky/materialy/1893/plastypro-stavebnictvi-a-nbsparchitekturu-1-uvod-do-zpracovani-plastu/> >
- [7] Arburg. *Uživatelská kompetence v technologii vstřikování – Důsledné využití inovačních technologií* [online]. Lossburg, 2007. [cit. 2015-04-16] Dostupné z : < www.arburg.com/com/common/download/Web_528390_CZ.pdf >
- [8] LENFELDT, Petr. *Technologie II* [online]. Technická univerzita v Liberci. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z : <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm>

- [9] BEROUN, Stanislav. *Úvod do strojírenství* [online]. Technická univerzita v Liberci. [cit. 2015-04-16] Dostupné z : < http://www.ksd.tul.cz/studenti/texty/uvod_do_strojirenstvi/UdS-5pr.pdf >
- [10] Technologie vytlačování. *IMG Bohemia* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.img-management.cz/technologie.htm>
- [11] Technologie vyfukování plastů. In: *Techno-mat* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: http://www.techno-mat.cz/data/katedry/ksp/KSP_NZP_PR_11_CZE_Lenfeld_Formy_pro_tehnologii_v_yfukovani_termoplastu_-_1.cast.pdf
- [12] Technologie rotačního tváření. *MOSTR* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.mostr.cz/Formy.html>
- [13] Technologie zpracování plastů. *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [14] Polyamid-6. *Kajman K* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.kajmank.cz/polyamid-pa-6-vlastnosti/>
- [15] Polymethylmethakrylát. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polymethylmethakryl%C3%A1t>
- [16] Polymethylakrylát. *Polymethylakrylát-charakteristika* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: Polymethylmethakrylát. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polymethylmethakryl%C3%A1t>
- [17] Polysulfon. *Plasteria* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.plasteria.cz/psu-polysulfon>
- [18] Polysulfon. *Vink- for plastics* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.vink.cz/psu>

- [19] Polykarbonát. *Plastpartner* [online]. 2015 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.plastpartner.cz/technicke-plasty/plny-polykarbonat-polycasa-pc>
- [20] Polykarbonát. *Tam- Pavlice* [online]. 2013 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.polykarbonatznajmo.cz/cs/vlastnosti-vyhody-vyuziti>
- [21] Polypropylen. *Petroleum* [online]. 2007 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyroby/polypropylen.aspx>
- [22] Polypropylen. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>
- [23] *Polyoxymetylén* [online]. 2015 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-tyy/pom.html>
- [24] HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru. HOMMEL CS. *HOMMEL CS* [online]. 2008-06-02 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <<http://www.hommeletamic.cz/sites/default/files/download/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylkytvaru.pdf>>.
- [25] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [26] NEZDAŘILÍKOVÁ, Martina. *Metrologická kontrola měřidla*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Koška, Ph.D.
- [27] PECHÁČEK, Martin. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný.

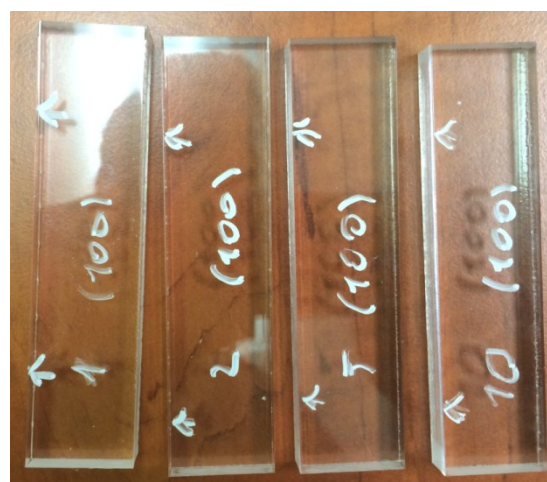
- [28] AICHLER, Jaroslav. *Systém managementu měření*. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Koška, Ph.D.
- [29] *METROLOGICKÁ KONFIRMACE MĚŘIDLA*. Brno, 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41432. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [30] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006. 112 s. ISBN 80-248-0671-1.
- [31] BÁTORA, Bohumil; VASILKO, Karol. *Obrobené povrchy: technologická dedičnosť, funkčnosť*. Trenčín: Trenčínská universita, 2000. 183 s. ISBN 80-88914-19-1.
- [32] HALUZÍKOVÁ, Barbora. Měření topografie plastových výlisků ve firmě PF PLASTY CZ s.r.o Bakalářská práce. Ostrava. 2008.
- [33] OHLÍDAL, Miloslav; PÁLENÍKOVÁ, Kateřina. *Možnosti optického profilometru MicroProf FRT při hodnocení kvality povrchu. Jemná mechanika a optika*. 2004, č. 9, s.251-259. ISBN 0447-6441.
- [34] KUSÁK, Ivo. *Konfokální mikroskopie* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z : < http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni_mikroskopie.pdf >
- [35] URBÁNEK, Michal. *Magnetické vlastnosti ultratenkých vrstev a struktur* [online]. Zpravodaj ČVS 17 (2) 2009 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: < http://www.vakspol.cz/z2009/zpr09_2.pdf >. ISSN 1213-2705.
- [36] HOŠEK, Jan. *Přehled klasických a moderních mikroskopických metod* [online]. ČVUT Praha, 2008. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: < <http://www.fsid.cvut.cz/cz/U2102/hosek/clanky/Mikroskopie.pdf> >

- [37] PLÁŠEK, Jaromír. *Konfokální mikroskop* [online]. Přírodovědecký časopis Vesmír, 1995/9. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: < <http://www.vesmir.cz/clanek/konfokalni-mikroskop> >. ISSN 1214-4029.
- [38] NIKON. *Základní metody světelné mikroskopie* [online]. Brno, 2004. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: < http://www.are.cz/documents/ZAKLADNI_METODY_SVETELNE_MIKROSKOPIE.pdf >
- [39] PIRKL, Slavomír. *Moderní mikroskopické metody* [online]. Univerzita Pardubice, 2003. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: < kf.upce.cz/Mod_mikr_metody_4.doc >
- [40] KUBÍNEK, Roman; PŮLKRÁBEK, Josef. *Moderní mikroskopické techniky* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: < <http://exfyz.upol.cz/didaktika/oprlz/mmm.pdf> >
- [41] Gravírovací a řezací CO2 laser. *První hanácká, BOW* [online]. 1992 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://cnc.bow.cz/produkt/7804060-gravirovaci-a-rezaci-co2-laser-e-4060/>
- [42] Hommel-Etamic W5. *Jenoptik* [online]. 1991 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.hommel-etamic.cz/cz/produkty/mereni-drsnosti-kontury/hommel-etamic-w5/>

8 Seznam příloh



Příloha 1. Ukázka pálení polypropylenu



Příloha 2. Ukázka pálení plexiskla



Příloha 3. Ukázka pálení polyamidu



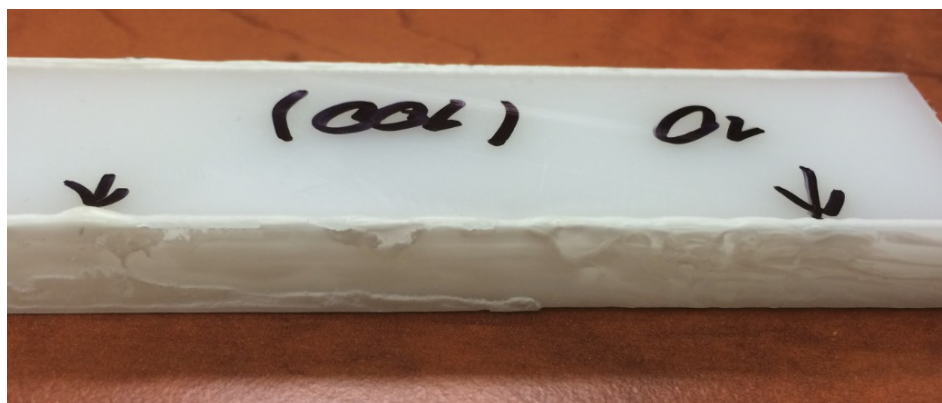
Příloha 4. Ukázka řezaného vzorku plexiskla $f=1$



Příloha 5. Ukázka změny řezaného vzorku plexiskla $f=10$



Příloha 6. Ukázka řezaného vzorku polyamidu $f=1$



Příloha 7. Ukázka změny řezaného vzorku polyamidu $f=10$



Příloha 8. Ukázka řezaného vzorku polypropylenu $f=1$



Příloha 9. Ukázka změny řezaného vzorku polypropylenu $f=10$